

Laboratoire Commun AdViTAM

Advanced Vibration Tests for the Analysis of rotating Machines

Eric Chatelet^a, Régis Dufour^a, Yvon Briend^a, Franck Legrand^a, M. Zaki Dakel^a, Marie-Ange Andrianoely^a, Sophie Baudin^b, Jacques Charvin^b

a. Univ Lyon, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, LaMCoS, F-69621, France,
eric.chatelet@insa-lyon.fr

b. Avnir,
s.baudin@avnir.fr

...

Résumé :

L'objet d'AdViTAM, Advanced Vibration Tests for the Analysis of rotating Machines, est de définir et de proposer des essais aggravés pour qualifier l'intégrité des machines tournantes et des structures soumises par la base à des sollicitations dynamiques extrêmes telles que séismes, houles, impacts. Les nouvelles méthodologies de qualification 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 et la sécurité des usagers.

AdViTAM allie AVNIR, entreprise innovante qui possède une expérience reconnue dans la conduite des essais pilotés, au LaMCoS, qui dispose d'un champ large de compétences dans le domaine de la dynamique des machines tournantes et des structures. AdViTAM est donc une opportunité de création de connaissances, de mutualisation de savoir-faire théoriques et expérimentaux pour répondre efficacement aux besoins des industriels notamment dans les filières des transports et de l'énergie.

Abstract :

The purpose of AdViTAM, Advanced Vibration Tests for the Analysis of Rotating Machines, is to define and propose aggravated tests to qualify the integrity of rotating machines and structures subjected by the base to extreme dynamic stresses such as earthquakes, swells, impacts. The new qualification methodologies based on models and experimental techniques must help design new architectures conciliating the increase in performance, the reduction of nuisances, the guarantee of integrity and the safety of users.

AdViTAM is a joint laboratory between AVNIR, an innovative company with proven experience in conducting pilot tests, and LaMCoS, which has large expertise in the field of rotating machinery dynamics and structures. AdViTAM is therefore an opportunity to create knowledge, pooling theoretical and experimental know-how to effectively meet the needs of industry, particularly in the transport and energy sectors.

Mots clefs : LabCoM, Essais aggravés, Structures embarquées, Machines Tournantes

1 Introduction

L'objet du LabCom AdViTAM est de développer et d'éprouver de nouvelles techniques d'essais et de qualifications de machines tournantes sous sollicitations dynamiques extrêmes, appelées dans la suite « essais aggravés ». Ce type d'essais est de plus en plus imposé aux équipementiers par les constructeurs, en particulier ceux du transport et de l'énergie. Dans le contexte de contraintes importantes, violentes comme les séismes, voire imprévisibles comme les impacts, les machines tournantes subissent des perturbations qui peuvent s'avérer importantes et les endommager de façon irréversible. Aussi préalablement à leur installation, d'importants efforts de recherche et de développement doivent être menés pour les qualifier dans de telles conditions extrêmes.

Le LabCom allie le **LaMCoS**, INSA Lyon, UMR CNRS 5259, qui dispose d'un large champ de compétences en simulation dans le domaine de la dynamique des machines tournantes, et la **PME AVNIR Engineering**, entreprise innovante qui possède une expérience reconnue dans la conduite des essais pilotés. C'est une opportunité de création et de mutualisation de connaissances ainsi que de savoir-faire tant théoriques qu'expérimentaux pour répondre efficacement aux besoins des industriels.

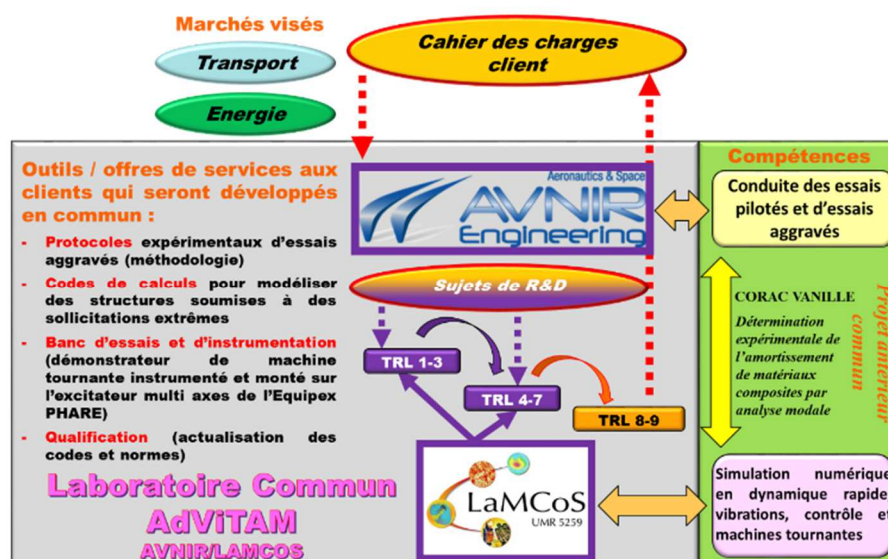


Figure 1. Interactions des partenaires dans le LabCom

2 Génèse & contextes scientifique, technologique et industriel

2.1 Génèse et Contexte scientifique : Equipex Phare

Le laboratoire, acteur historique dans la dynamique des structures et des machines tournantes, s'est engagé fortement dans une voie d'investigation expérimentale par l'intermédiaire de l'Equipex Phare (Plateforme machines tournantes pour la maîtrise des Risques Environnementaux) (Convention attributive ANR-10-EQPX-43)¹, du pôle lyonnais (Ecole Centrale Lyon, INSA Lyon, ENS Lyon). Le module 3, un excitateur 6 axes (Fig. 2), possède 6 voies pilotées en temps réel à même de reproduire diverses combinaisons de sollicitations autour des 3 axes (translations et rotations) avec des niveaux

¹ www.ec-lyon.fr/campus/vie-campus/grands-projets/equipex-phare

exceptionnels en termes de déplacement, vitesse et accélération dans une gamme de fréquence allant jusqu'à 250 Hertz.

Cet équipement d'excellence offre de nouvelles perspectives en matière d'essais (mono et/ou multiaxiaux) aggravés de structures embarquées de masse maximale de 450 kg dans une gamme [0-250] Hz avec des excitations sinus, aléatoires, chocs ou encore réplique de signaux préalablement enregistrés et avec des niveaux maximums d'accélération de 10g, de déplacement en translations de +/- 50 mm et en rotation de +/- 4°. Le LabCom permet ainsi de renforcer les connaissances déjà acquises par le LaMCoS et d'apporter des solutions aux problématiques scientifiques liées aux besoins industriels.

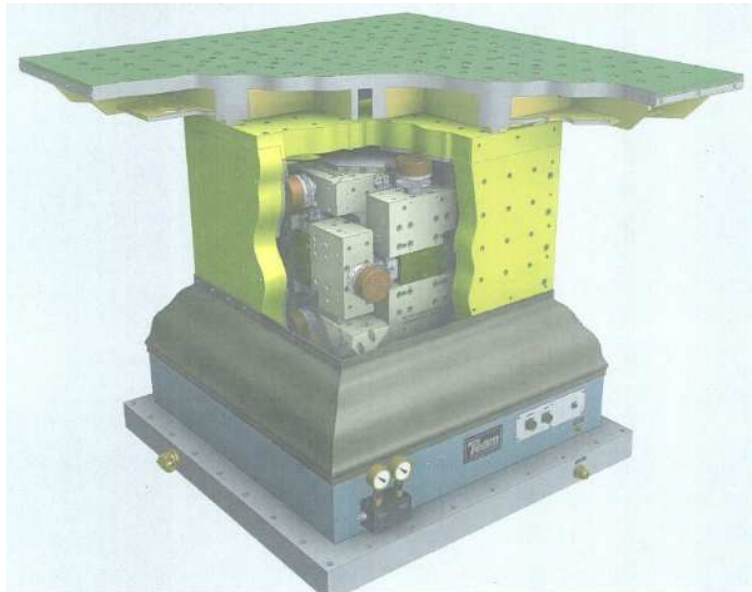


Figure 2 : Eclaté de l'excitateur multi axes avec un expander

2.2 Contexte technologique et industriel

D'un point de vue technologique, la collaboration avec AVNIR, PME spécialisée dans la conduite d'essais pilotés et/ou asservis, joue un rôle déterminant. L'expertise de la PME consiste à appréhender les problématiques vibratoires dans les structures et machines tournantes notamment par des approches de simulation et par la conduite et l'analyse d'essais spécifiques. Ces études ont vocation d'accompagner ses clients des domaines aéronautique et énergétique, nucléaire et pétrolier, dans la fiabilisation de leurs équipements actuels mais surtout dans celle de nouveaux équipements qu'ils souhaitent mettre en exploitation. La connaissance et la réponse du comportement précis de ces équipements aux sollicitations et contraintes extérieures (séisme, houle, écoulements, manœuvres, et toutes autres excitations par la base...) sont indispensables pour établir les spécifications pertinentes de leur bon fonctionnement. AVNIR est amenée à développer des méthodes spécifiques et innovantes de qualification, par la définition de programmes d'essais aggravés personnalisés à chaque équipement sensible. Une analyse poussée des profils de vie et des environnements extérieurs habituels et exceptionnels permet aux expérimentateurs d'AVNIR de déterminer des programmes d'essais pour chaque contexte particulier. L'entreprise souhaite structurer cette expertise dans le domaine de la personnalisation des essais aggravés, objet du LabCom pour répondre plus efficacement aux besoins des clients.

D'un point de vue industriel, aujourd'hui, la PME AVNIR apporte sa connaissance des qualifications d'équipements aéronautique et énergétique, basées sur les normes RTCA DO160F, MIL STD 810 E,

GAM EG13 AIR, EDF HN 20 E 53, CEI 68-2-X [1-4]. Ces normes génériques ne s'avèrent pas toujours pertinentes pour dimensionner de façon optimale des équipements en environnement extrême, comme c'est le cas dans l'aéronautique et l'énergie. Les techniques classiques qualifient les équipements dans un environnement standardisé mais sont insuffisantes pour déterminer les marges de sécurité restantes et analyser précisément les modes de défaillance (Fig. 3). Pour mieux déterminer ces marges de sécurité, AVNIR propose plusieurs approches et méthodes d'essais personnalisés aggravés (HALT, HASS, Sticke, Striffe, EDSS aéro), mais construites empiriquement sur des retours d'expérience clients.

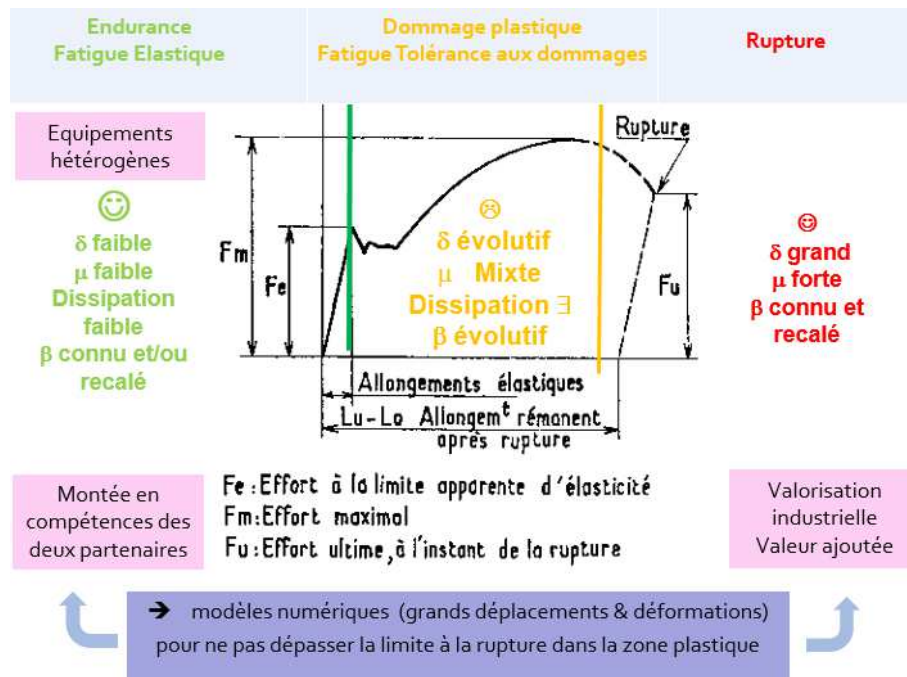


Figure 3 : Objectifs du LabCom AdViTAM

Un des défis du LabCom est de simuler numériquement le comportement dynamique de machines sous sollicitations extrêmes de leur profil de vie, pour en estimer leur durée de vie. En effet, beaucoup de simulations sont aujourd'hui efficaces dans le domaine linéaire : petits phénomènes (déplacements, déformations, température) à variation lente. Mais très peu de méthodes numériques se sont attachées à simuler l'impact des variations rapides d'environnement, des forts taux de déplacement ou de déformation non linéaires sur la fiabilité des machines.

Tout l'enjeu du LabCom réside dans la définition de nouvelles méthodologies/normes de qualifications multiaxiales d'équipements embarqués.

3 Feuille de route & structuration

Le LabCom vise à développer des techniques d'essais dynamiques aggravés à l'aide d'une plateforme unique en France, notamment destinée aux systèmes en rotation embarqués et aux structures sous sollicitations sévères. Les innovations autour des essais aggravés nécessitent le transfert des moyens et des méthodes d'acquisition, d'analyse, maîtrisés vis-à-vis des sollicitations classiques (environnements vibratoires maîtrisés...) vers des cas de sollicitations dynamiques extrêmes avec de grands déplacements par exemple. La principale spécificité du LabCom est de contribuer à la conception fiable, basée sur 5 stades de développement : la personnalisation d'essai, la simulation numérique et l'expérimentation sur un démonstrateur spécifique à développer et équipé de capteurs de surveillance dédiés.

3.1 Axes de recherche

Afin de répondre efficacement à ce challenge, LaMCoS et Avnir se sont structurées autour des axes de recherche détaillés dans le tableau 1. Les triangles « rouge » traduisant la participation du Laboratoire, les bleus celle de la PME :

Tableau 1. Feuille de route de Recherche et d'Innovation

Axe n°1 : TRL 3-4 Structures embarquées	- Développement de modélisations pour structures « embarquées » sur l'excitateur 6-axes de l'Equipex PHARE	- Consolidation de travaux de thèses antérieures en vue d'applications industrielles spécifiques. - Développement initial de l'Interface Homme Machine	Essais embarqués, Codes de calculs (Matlab) Eléments Finis, avec IHM T0+6 mois
Axe n°2 : TRL 2-4 Simulation numérique	- Développement de modélisations pour structures soumises à des sollicitations extrêmes	- Prise en compte dans le modèle de la vitesse de rotation variable et des excitations non stationnaires - Poursuite Développement d'une Interface Homme Machine	Codes de calculs (Matlab) Eléments Finis, avec IHM « ADVISOR » T0+16mois
Axe n°3 : TRL-5-7 Essais sur démonstrateur instrumenté	- Validation expérimentale des modèles développés par essais aggravés sur un démonstrateur de machine tournante instrumenté et monté sur l'excitateur 6-axes de l'Equipex PHARE - Rapport thèse	- Conception et réalisation du démonstrateur - Campagnes d'essais - Corrélations numériques/expérimentales - Fin du développement de l'Interface Homme Machine	Banc d'essais démonstration IHM « ADVISOR » Rapports d'essais T0+24mois
Axe n°4 : TRL 1-3 Identification des essais et normes existants avec sollicitations extrêmes.	- Analyse technique critique des méthodologies d'essais aggravés existantes - Normes de qualification actuelles	- Analyse des environnements de travail spécifiques aux applications	Rapport d'analyse sur les mises en œuvre d'essais aggravés, T0+3mois T0+24mois
Axe n°5 : TRL 2-3 Personnalisation d'essais	- Proposition de nouvelles méthodes de personnalisation et de durcissement des essais	- Analyse des environnements de travail spécifiques aux applications - Etude des limites de durcissement des essais	Protocole d'essais aggravés T0+12mois T0+36mois

3.2 Structuration

Les applications visent les marchés de haute technologie aéronautique et énergie. Les modèles éléments finis développés dans le cadre du LabCom pourront être intégrés dans le contexte industriel. Des recommandations en termes d'essais aggravés multiaxiaux seront transmises auprès des industriels régionaux et nationaux, accroissant ainsi la qualification et la fiabilité des équipements. De même, des journées techniques spécifiques seront menées en coordination avec le pôle Nuclear Valley (anciennement Pôle Nucléaire de Bourgogne) et le cluster Aerospace ARA pour faire connaître cette plateforme unique en France auprès d'un grand nombre d'industriels.



Figure 4 : Partenaires et pérennisation du LabCom

Au cours des 3 années de synergie entre les 2 partenaires, les points suivants seront poursuivis :

- L'effort de ressourcement scientifique en continuant à intégrer dans les modélisations les effets des non linéarités, des couplages et des paramètres incertains.
- L'effort de professionnalisation en adoptant une démarche qualité dans les protocoles de calculs et de mesures, et en établissant un plan de communications.
- L'effort de prospection vers les industriels nationaux et/ou internationaux afin d'obtenir des soutiens financiers grâce à des recherches contractuelles voire collaboratives.

Grâce à ces efforts, le LabCom assurera son modèle économique et, par voie de conséquence, sa pérennité.

4 Premières avancées « scientifiques »

4.1 Rotors Embarqués

La consolidation des travaux antérieurs du laboratoire a permis la définition d'une modélisation d'un rotor embarqué à 6 degrés de liberté par nœuds, en vitesse non stationnaire. Une fois le mouvement du support rigide défini, les équations de mouvement du rotor embarqué sont obtenues à partir d'une modélisation éléments finis du système et de l'application des équations de [5–8].

Le rotor étudié est présenté Figure 5. Il se compose d'un arbre élancé, supportant 3 disques identiques, et monté sur 2 paliers hydrodynamiques. Les hypothèses principales sont les mêmes que celles données dans [14]. Parmi celles-ci, l'arbre, de section circulaire constante, est discrétisé par des éléments de poutre de Timoshenko ; les disques et le bâti du rotor sont considérés infiniment rigides ; seule la flexion de l'arbre est considérée et l'on suppose des petits déplacements pour garder le système linéaire. Enfin les paliers hydrodynamiques ne respectent pas nécessairement l'hypothèse de paliers courts [9].

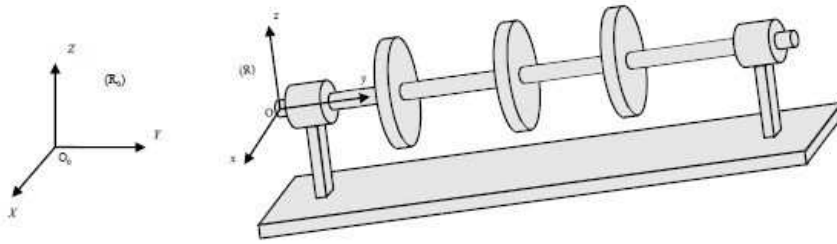


Figure 5 : Modélisation d'une machine tournante embarquée

Après développements, les équations régissant le comportement de la machine embarquée sont données par l'équation (1).

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + ([G(\Omega)] + [C_{jb}(\Omega)] + [C_{ba}(t)]) \{\dot{\delta}\} + ([K] + [K_{jb}(\Omega)] + [K_{ba}(t)]) \{\delta\} = \{F_u(t)\} + \{F_{ba}(t)\} \quad (1)$$

Où $[M]$, $[G(\Omega)]$, $[K]$ sont respectivement les matrices de masse, gyroscopique et raideur du système. $\{F_u(t)\}$ représente le vecteur des forces de balourd, $\{\delta\}$ le vecteur inconnu des déplacements. Les matrices d'amortissement et de raideur $C_{jb}(\Omega)$ et $K_{jb}(\Omega)$ viennent de la linéarisation des équations de mouvement des forces dans les paliers hydrodynamiques qui dépendent de la vitesse de rotation du rotor Ω (comme pour la matrice gyroscopique). Les mouvements de la base fournissent les matrices $[C_{ba}(t)]$, $[K_{ba}(t)]$ ainsi que le vecteur force $F_{ba}(t)$. Ces matrices dépendent du temps puisqu'elles sont directement liées aux mouvements de rotation de la base alors que le vecteur force $F_{ba}(t)$ dépend des 6 degrés de liberté de la base. La résolution de telles équations en vue de la détermination des réponses du système ou de construction de cartes d'instabilité via la théorie de Floquet doit faire appel à des méthodes de résolution/réduction spécifiques dont la précision et l'efficacité doivent être éprouvées.

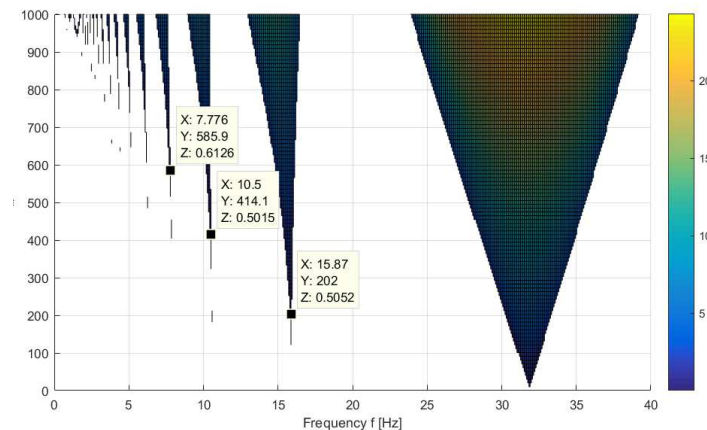


Figure 6 : Carte d'instabilité d'une machine tournante embarquée

4.2 Brique Logicielle : Interface Homme Machine AdDVISOR

Parallèlement à ces éléments théoriques, une interface Homme machine (IHM) est en cours de développement afin d'être en mesure de modéliser toute machine tournante industrielle embarquée.

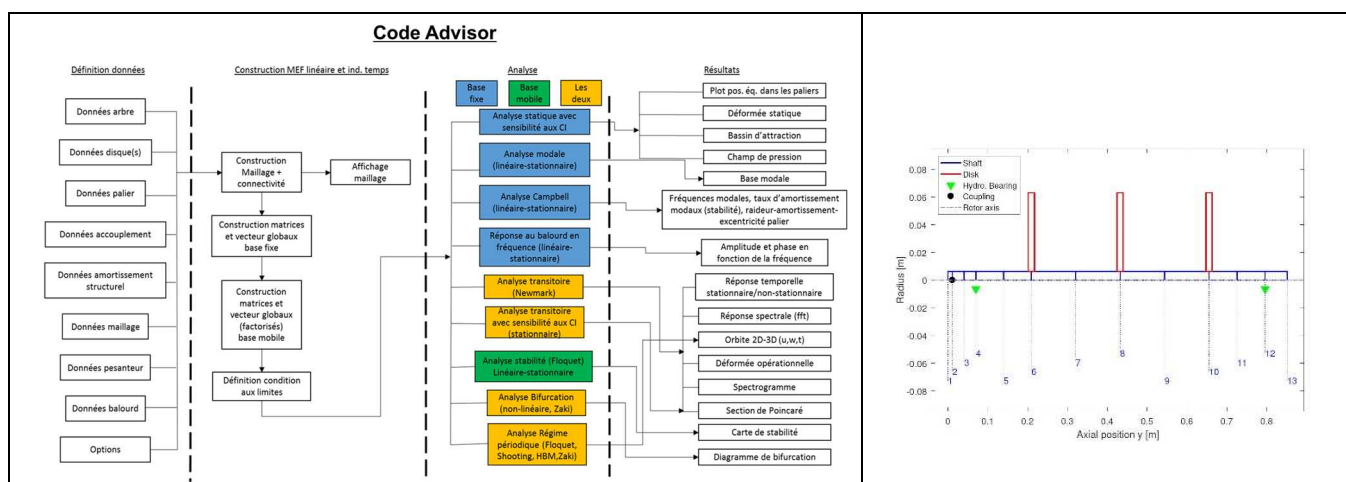


Figure 7 : Développement de l'IHM pour les industriels

4.3 Démonstrateur et Pilotage

Dans le but de valider les modèles numériques simulant le comportement dynamique de systèmes embarqués, des campagnes expérimentales seront menées sur l'excitateur 6 - axes de l'Equipex Phare afin de générer des excitations (en translation(s) et/ou en rotation(s) mono et multi axiales) du support rigide. Ces campagnes de tests intégreront la prise en compte de vitesse de rotation variable ainsi que des excitations non stationnaires. Le démonstrateur instrumenté par une chaîne de mesure de haute précision est présenté figure 8.

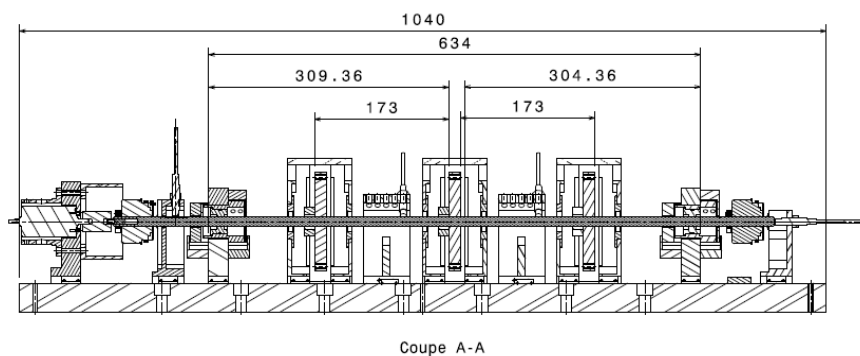


Figure 8 : Démonstrateur Machine tournante

4.4 Les essais aggravés

Un des objectifs des essais aggravés est de mieux connaître son produit en explorant ses marges de fonctionnement/destruction associées. Ceci est résumé en Figure 9. Ainsi, des contraintes augmentées de manière échelonnée sont appliquées au système jusqu'à l'obtention d'un mode de défaillance, qui doit être corrigé dans la mesure du possible (si une limite technologique n'est pas atteinte). A chaque correction de défaut, la robustesse du produit est alors augmentée, et le domaine actuel révélé par les essais aggravés est augmenté. Le profil type d'augmentation échelonnée des sollicitations est différent d'un système à l'autre, et dépend essentiellement de sa nature (électrique, électronique, mécanique). Pour les systèmes électroniques, il existe depuis peu un certain nombre de norme/recommandation/guide avec des profils de sollicitations bien spécifiques. En revanche, pour les systèmes purement mécaniques, il n'existe actuellement aucune norme spécifique [10-14].

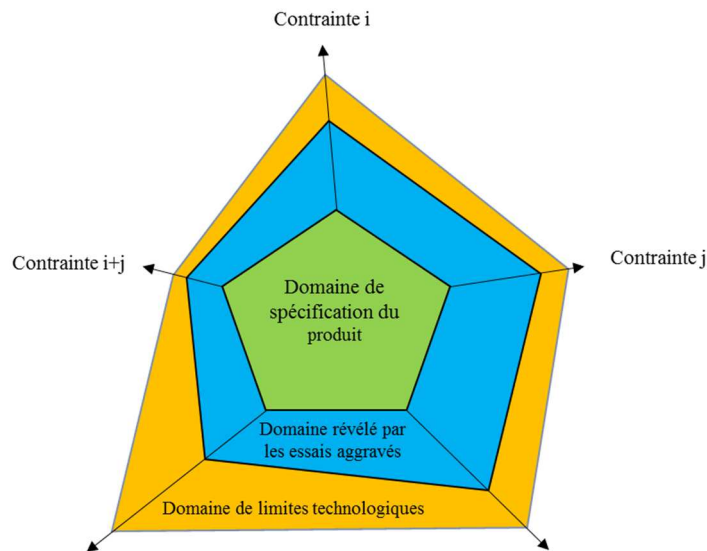


Figure 9 : Essais aggravés

Aussi, la réussite du laboratoire est à terme d'aboutir à la mise à jour des normes de qualifications des équipements militaire, nucléaire, aéronautique, naval, etc.

5 Perspectives & Pérennisation

Les compétences et avancées scientifiques apportées par le LabCom AdViTAM par rapport aux compétences actuelles des partenaires sont explicitées dans le tableau ci-dessous :

Compétences/Avancées scientifiques	actuelles <u>LaMCoS</u>	actuelles <u>Avnir</u>	apportées par <u>AdViTAM</u>
Modèles et expérimentation phénoménologiques, pré-dimensionnement	***	*	****
Identification des lois et des paramètres	**	*	**
Modèle 3D et simulation, outil plus métier	**	**	**
Conseils & Préconisation	**	**	**
Contrôle passif et/ou actif	**	*	**
Prototype	*	*	**
Surveillance & diagnostic	**	**	***
Essais pilotés	*	***	****
Essais aggravés		**	*****
Prescription de normes			****

Figure 10 : Compétences et avancées scientifiques apportées par le LabCom

Au terme des trois années soutenues financièrement par l'ANR, les apports du LabCom seront pérennisés notamment par :

- Un renforcement de l'activité de pilotage de campagnes d'essais spécifiques qui est stratégique pour AVNIR,

- Une augmentation des personnels impliqués sur cette thématique au sein d'AVNIR, assurant les capacités de réponse aux demandes industrielles,
- Un transfert de compétences en essais aggravés personnalisés vers le laboratoire. Ainsi fort de cette nouvelle expertise sur son thème historique Machines Tournantes, le LaMCoS pourra proposer aux industriels d'aller plus loin dans le cadre du LabCom.

Le but final du partenariat est donc de développer et valider des procédures de qualifications nouvelles dont les secteurs du transport et de l'énergie sont demandeurs.

Remerciements

This work was supported by the French National Research Agency (ANR) convention ANR-16-LCV1-0006.



Références

- [1] Norme RTCA D0160G “Environmental Conditions and test Procedure for Airborne Equipment” (2010)
- [2] Norme MIL STD 810 F “Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests” (2000)
- [3] Norme GAM-EG 13 B “Essais de Compatibilité à l’environnement climatique, mécanique, électrique, électromagnétique et special des matériels aéronautiques » (1987)
- [4] Norme CEI 68-2-X : Essais d’environnement »
- [5] Duchemin, M., Berlioz, A., and Ferraris, G. “Dynamic behavior and stability of a rotor under base excitation”. In: Journal of Vibration and Acoustics 128.5 (2006), pp. 576–585.
- [6] Dakel, M., Baguet, S., and Dufour, R. “Nonlinear dynamics of a support-excited flexible rotor with hydrodynamic journal bearings”. In: Journal of Sound and Vibration 333.10 (2014), pp. 2774–2799.
- [7] Dakel, M., Baguet, S., and Dufour, R. “Steady-state dynamic behavior of an on-board rotor under combined base motions”. In: Journal of Vibration and Control 20.15 (2014), pp. 2254–2287.
- [8] Jarroux C., Dufour R., Mahfoud J., Defoy B., Alban Th., Delgado A., Touchdown bearing models for rotor-AMB systems, Journal of Sound and Vibration 440, 51-69, 2019
- [9] Frene, J., Nicolas, D., Degueurce, B., Berthe, D., and Godet, M. Hydrodynamic lubrication: bearings and thrust bearings. Vol. 33. Elsevier, 1997.
- [10] BNAE : RG.Aéro 000 29
- [11] Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés, thèse Ouahiba TEBBI
- [12] Essai Industriel ASTE 2002
- [13] Fiabilité, Déverminage et Essais (accélérés et aggravés), J. Ringlet, support de cours ASTE, 2008
- [14] Standard Operating Procedure for Highly Accelerated Life Test (HALT): Design and Standardization of Fixture Setup for Circuit Board, D.C.X Han, Master Thesis at Massachusetts Institute of Technology, 2016