

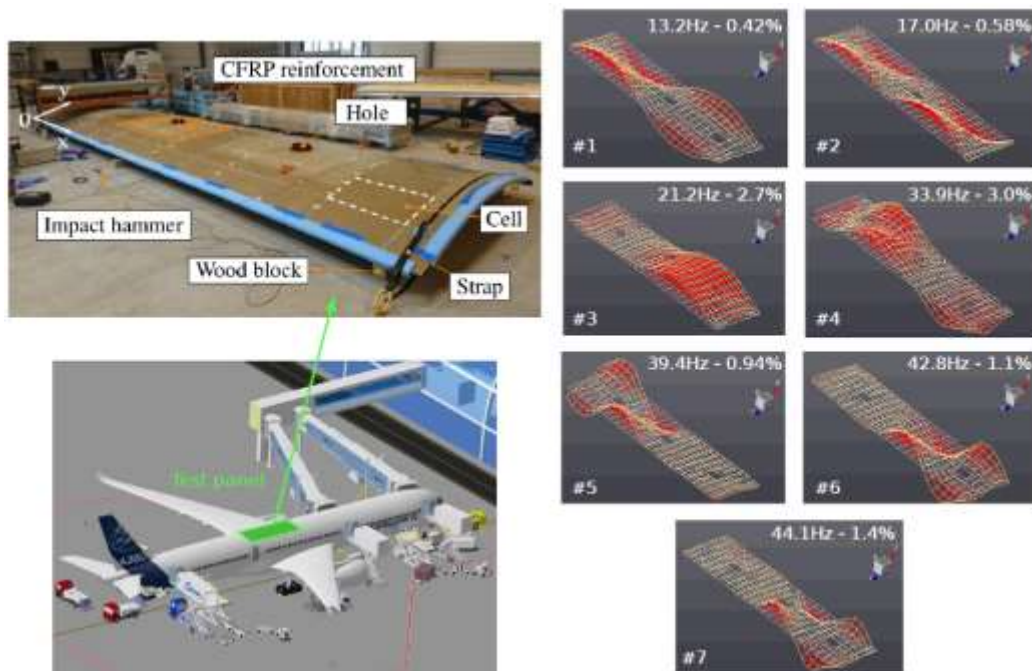
## AAAF - COMMISSION STRUCTURES

### Synthèse de la journée scientifique 3AF Les problèmes inverses pour l'analyse structurale dans le secteur aérospatial 22 octobre 2020

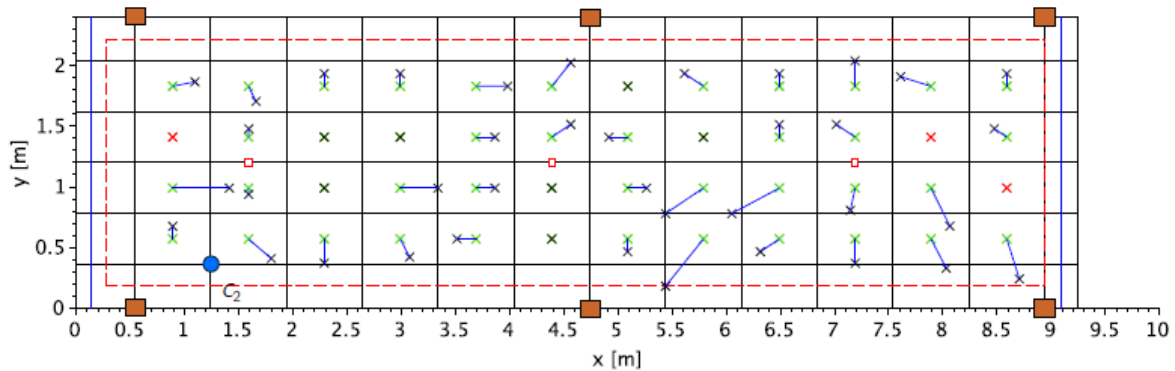
*Bernard Troclet, 3AF*

Cette journée, organisée par la Commission Structures de l'Association Aéronautique et Astronautique de France 3AF, par l'ONERA et ISAE Sup'Aéro, a porté sur l'utilisation de méthodes inverses dans l'analyse de structures aérospatiales. Elle s'est déroulée entre deux confinements sous une forme mixte, en présentiel (environ 20 personnes) et en distanciel (environ 80 personnes). Elle comprenait 10 présentations et une table ronde, où les mondes académique et industriel étaient représentés (AIRBUS, CNAM, ONERA, Sup'Aéro, DASSAULT, ENSAM, CEVAA, AIRBUS HE). En effet, et comme nous le verrons, les méthodes inverses intéressent un vaste champ d'application dans le domaine des structures aérospatiales. En ont témoigné les exposés de la journée : surveillance de santé, détection de défauts et de fissures, caractérisation d'efforts, de charges acoustiques ou de modèles de matériaux, recalage de modèles.

Concernant le vaste sujet de l'analyse vibratoire, l'exposé de D. Gendre d'AIRBUS et D. Goutaudier du CNAM & ONERA portait sur la localisation d'impact par une technique de triangulation dans le domaine fréquentiel avec application sur des structures aéronautiques composites. Un grand nombre d'activités simultanées se produisent lors des opérations au sol des avions. Il en résulte des risques d'impacts qu'il convient d'identifier en termes de localisation et de nature. L'idée est ici de développer une démarche de détection/localisation automatique embarquée de ces impacts, afin d'améliorer les procédures de maintenance et réduire les temps d'immobilisation. Pour ce faire, des mesures de vibration sont opérées sur l'avion et l'objectif est de déterminer par une méthode inverse la localisation de ces impacts. Après analyse de l'Etat de l'Art, au lieu de s'appuyer sur une méthode classique de triangulation temporelle, une approche par triangulation fréquentielle, utilisant le fait que les modes de vibration de la structure ne sont pas excités dans les mêmes proportions en fonction de la position de l'impact, est retenue. Cette approche est appliquée à un panneau composite de grandes dimensions (figure 1) et sur l'AIRBUS A350-1000 MSN003. Les résultats montrent que cette approche permet de localiser avec succès les impacts à n'importe quel endroit sur le panneau (figure 2) et l'avion, avec un faible nombre de capteurs. Cette approche a fait l'objet d'un dépôt de brevet (EP3590847).

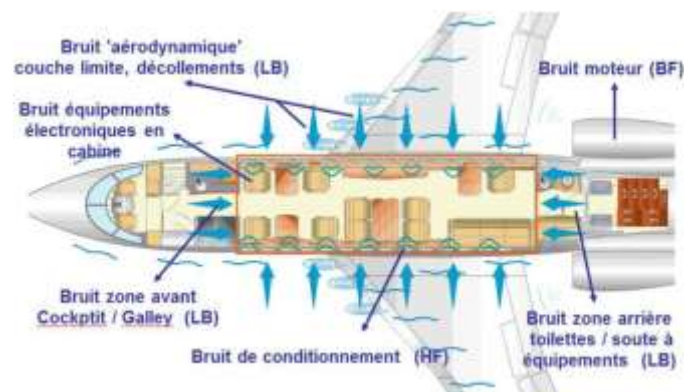


**Figure 1 : Tests sur panneau composite de grandes dimensions**



**Figure 2: Localisation des impacts appliqués sur le panneau composite à partir des mesures d'un unique accéléromètre (croix noire : impact appliqué, croix verte : impact identifié, croix rouge : échec)**

La présentation suivante, de Dassault-Aviation, intitulée « *Application de la Méthode Energétique Simplifiée MES Inverse à l'identification des sources acoustiques entrantes dans une cabine de Falcon* », par M. Pouzargues, concernait une méthodologie d'identification des flux acoustiques entrant dans une cabine d'avion d'affaires, la famille Falcon (Thèse à l'Ecole Centrale de Lyon de P. Hardy 2005 dirigée par Prof. L. Jézéquel). Le confort acoustique, à la demande pressante des clients, devient un des éléments clés de la conception des avions: le FALCON 8X est ainsi le premier avion faisant l'objet d'un objectif de niveau de bruit interne dès sa conception. Des charges acoustiques multiples, la plupart couvrant de larges bandes de fréquences, sont ainsi appliquées à l'avion d'affaire, comme le montre la figure 3. La présentation s'intéressait plus particulièrement au domaine des moyennes et hautes fréquences, domaine fréquentiel adapté à la MES. Les coefficients d'absorption des matériaux couvrant les parois internes sont issues de différentes bases de données (mesures Tube de Kundt). Les flux entrant dans la cabine sont déterminés par la méthode MES inverse, à partir de mesures de pression interne et de mesures intensimétriques lors d'essais en vol. Cette démarche a permis une hiérarchisation des sources acoustiques et une conception en tenant compte de la perception des clients. Il a été ainsi démontré que la MES inverse était adaptée aux spécificités de la conception d'une cabine de FALCON (multiplicité des sources, complexité de la structure).



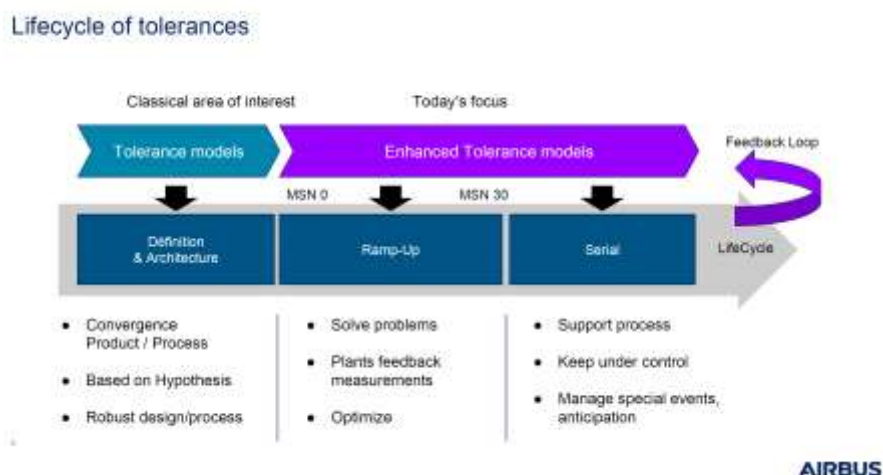
**Figure 3 : Charges acoustiques appliquées à un avion d'affaires**

L'exposé de L. Gavérina, ONERA/DMAS, était intitulé « *Méthodes inverses appliquées aux mesures de propriétés thermophysiques de matériaux composites* ». Ces matériaux composites sont de plus en plus présents dans la construction aéronautique. Ainsi, 30% du fuselage de l'A400M est dès l'origine réalisé en matériaux composites à matrice organique CMO. Qui plus est, les pièces métalliques ou les zones défectueuses sont de plus en plus souvent remplacées par du composite. Il est ici proposé de détecter les défauts initiaux ou induits par des impacts dans les composites par la mesure de leurs propriétés de diffusivité thermique par thermographie laser. A l'utilisation de caméras thermiques, qui ont pour inconvénient de déposer une faible quantité d'énergie et de générer peu de gradient de température sur l'échantillon, sont préférées les méthodes recourant aux lasers impulsionnels à forte capacité de dépôt d'énergie sur l'échantillon, mais dont l'exploitation nécessite la connaissance d'une cartographie de diffusivités thermiques dans le plan du matériau hétérogène. Trois axes privilégiés d'analyse sont ainsi étudiés selon qu'on considère une excitation dans les axes d'anisotropie du matériau, hors de ces axes d'anisotropie, ou un balayage laser. La cartographie des diffusivités

thermiques est établie en s'appuyant soit sur la Méthode des Paraboles Logarithmiques MPL dans le plan d'un matériau hétérogène suite à un balayage laser de type GPFS, soit sur la Méthode des Ellipses Logarithmiques MEL dans le cas de l'excitation hors des axes d'anisotropie, qui permet d'estimer le tenseur de diffusivité thermique et l'angle d'orientation des axes d'anisotropie. Enfin, la technique CVFS (Constant Velocity FlyingSpot) en configurations « échantillon mobile/laser immobile » et « échantillon immobile/laser mobile » est présentée. Ces deux techniques offrent les avantages suivants : la première permet d'identifier les hétérogénéités dans des échantillons macroscopiques, la seconde permet de mesurer les propriétés thermiques de matériaux en ligne de production. La fiabilité de la méthode pour mesurer la diffusivité thermique dans le plan a été démontrée, avec une erreur inférieure à 4%.

Comme rappelé par Y. Gourinat et J. Morlier (ISAE-SUPAERO) dans leur conférence « *La liasse modale, ADN de la structure en vol* », le monde industriel a souvent recours aux méthodes inverses quand il s'agit d'identifier une grandeur physique  $p$  inaccessible à l'expérience ou au calcul numérique (sources acoustiques au décollage des lanceurs, choc généré par des séparations pyrotechniques au droit de la séparation, ...) à partir d'une grandeur  $d$ , directement accessible à l'expérience. La démarche suppose que l'on ait à disposition un modèle mathématique direct fournissant  $d$  en fonction de  $p$ . La solution d'un problème inverse, lorsqu'il est mal posé, n'est pas unique et nécessite l'utilisation d'une fonction coût, idéalement fondée sur la physique et garantissant l'unicité de la solution, comme le rappelle et l'illustre cet exposé.

Dans un tout autre domaine, l'exposé de J. Martin et J.-P. Navarro d'AIRBUS SAS, intitulé « *Tolérancement et recalage de modèles géométriques avion avec mesures physiques* » s'est intéressé au processus de tolérancement dimensionnel. Le tolérancement a un rôle clé dans le processus de fabrication des avions. Il doit être suffisamment précis pour couvrir des incertitudes variées, non seulement pour assurer l'assemblage et la fonctionnalité de l'appareil, mais pas excessivement précis, pour minimiser les coûts de production et éviter une sur-qualité. En phase de conception, le tolérancement dimensionnel est partagé entre différents contributeurs dans une démarche descendante (Top-down), à partir des exigences de haut niveau du produit (dimensions, fonctionnalités ...). Puis, la cohérence des tolérances partagées et des exigences fonctionnelles est analysée dans une phase ascendante (bottom-up), des sous-ensemble à l'avion. Les mesures effectuées en phase de production permettent de recalibrer le partage de la tolérance, affecté aux différents contributeurs. Du développement du produit à la phase de série, l'analyse de la tolérance est un processus en boucle (voir figure 4), afin de gérer une production efficace, et d'assurer la sécurité et la performance de l'avion. La présentation a en particulier détaillé comment les approches statistiques pouvaient être utilisées non seulement dans la phase de conception pour répondre aux exigences fonctionnelles liées à la performance et à la sécurité des produits, mais aussi en phase de production avec le recalage rendu possible par les données mesurées en production.



**Figure 4 : Cycle de vie des tolérances de dimensionnement**

Premier d'une série évoquant le sujet de la fissuration, l'exposé de R. Ferrier, P. Gosselet et M.-L. Kadri (LMA Marseille, LamCube Lille, Lamsin Tunis) portait sur « *L'identification de fissures en statique par l'écart à la réciprocité* », objet d'une thèse à l'ENS Paris-Saclay. Il s'attache à la résolution de deux problèmes : (1) la reconstruction de conditions aux limites manquantes sur un bord à partir de conditions aux limites redondantes sur un autre bord (problème de Cauchy). Ce problème est résolu

par la méthode de Steklov-Poincaré, et (2) l'identification de fissures à partir de données de bord. Ce problème inverse est résolu par la méthode de l'écart à la réciprocité. Des algorithmes ont été développés afin que l'approche proposée permette d'identifier les fissures à partir de données partielles sur le bord, d'une part, et d'identifier les fissures de forme quelconque, d'autre part. Cette approche peut être étendue aux problèmes thermiques stationnaires et aux problèmes électrostatiques.

Autre cas d'application des méthodes inverses à la fissuration, celui des cellules d'hélicoptères soumises à des charges variées et complexes comme les pressions aérodynamiques en vol et les charges en fatigue dues aux parties tournantes. D. Dayan d'Airbus Hélicoptères, dans son exposé intitulé « *Fatigue Damage Prediction via DFEM for Helicopter airframes* », s'intéresse ainsi à l'identification des fissures (initiation et propagation) apparaissant sur la partie supérieure des cellules d'hélicoptères. Il convient d'identifier et de caractériser les chemins de transmission des efforts dans la partie supérieure de la cellule, induits par le rotor et la boîte de vitesses. La méthodologie proposée allie les modélisations par éléments finis (Detailed Finite Element Method DF) de la partie supérieure, du rotor MRH et de la boîte de vitesse MGB, à l'instrumentation en vol et au sol. Les charges conduisant à l'apparition de fissures en fatigue sont déterminées par méthode inverse. Un critère d'amorçage des fissures est utilisé. Une fois la méthodologie validée, elle est utilisée pour s'assurer que les modifications de conception permettent de s'affranchir de l'apparition de fissures. Cette méthodologie vise à prévenir l'apparition de telles fissures durant la phase d'exploitation des hélicoptères.

Comme souligné par F. Chinesta dans son exposé, illustré par une application à la question de fissuration via la résolution d'un problème thermique 2D, et intitulé « Méthodes inverses temps réel », le monde industriel est en pleine évolution. Les modélisations doivent aujourd'hui non seulement permettre de concevoir les produits, mais aussi de savoir en gérer les performances. La présentation met ainsi l'accent sur l'exemple du développement d'un jumeau numérique, capable d'apprendre de son jumeau physique, et de se corriger. La gestion de la performance du jumeau numérique repose sur le traitement de données en temps réel, et donc l'utilisation de méthodes en réduction de modèles. Si les approches éléments finis FEM, la POD (Proper Orthogonalized Decomposition) et la PGD (Proper Orthogonalized Decomposition) sont bien connues, l'exposé se focalise sur les solutions paramétriques qui permettent en temps réel, la simulation, l'optimisation, la propagation des incertitudes et l'analyse par méthodes inverses. L'assimilation des données en temps réel s'appuie sur des approches PGD non intrusives, sur les méthodes inverses avec ou sans régularisation, ou des filtres de Karman. Les modèles peuvent finalement encore être enrichis par méthodes hybrides.

S'ensuivait un retour aux « sources », vibroacoustiques cette fois, avec un exposé traitant de leur caractérisation qui représente un autre enjeu important pour de nombreux secteurs industriels et, par voie de conséquence, qui constitue un élément important pour le développement de maquettes numériques. La présentation de N. Merlette (CEVAA) intitulée « *Détermination de torseurs d'efforts pour la caractérisation de sources vibroacoustiques* » avait pour objet l'emploi de méthodes inverses pour l'identification des torseurs d'efforts in-situ, afin de remplacer des essais classiques dits d'efforts bloqués, jugés trop longs et onéreux. La première application présentée concerne le domaine automobile, où les véhicules sont soumis à de nombreuses sources vibratoires basses et moyennes fréquences. L'idée est ici de déterminer par méthode inverses des torseurs équivalents d'efforts générés par une source vibratoire émise directement dans l'environnement de l'objet étudié. La démarche consiste à mesurer les fonctions de transfert (force générée au point d'impact/force coup de marteau) et à les projeter en un point virtuel d'intérêt et obtenir ainsi un torseur d'efforts et moments. Cette opération demande l'inversion de la matrice de transfert dont il faut donc vérifier le bon conditionnement. Un soin particulier doit ainsi être apporté au contrôle des mesures (l'amplitude des impacts des coups de marteau et leur direction doivent être maîtrisées, et la position des capteurs soigneusement relevée et non modifiée au cours des différentes campagnes d'essais). La méthode a été appliquée à l'aéronautique (actionneur d'un siège d'avion). Il a été montré que cette démarche permettait des gains en temps et une réduction des budgets nécessaires à la mise en oeuvre de la méthode des efforts bloqués. Comme toute méthode inverse, elle doit être manipulée par des experts tant numériques qu'en métrologiques, et elle nécessite une bonne connaissance a priori du problème physique.

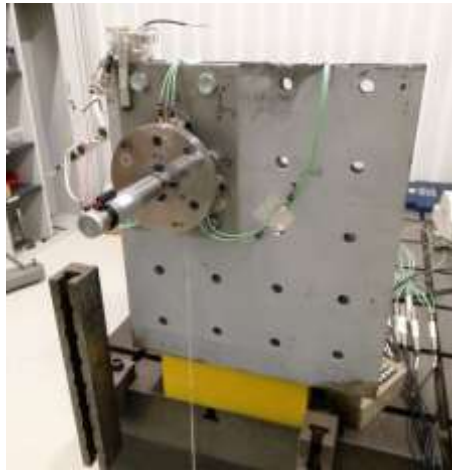


Figure 5 – Illustration d'une mesure d'efforts bloqués sur un actionneur de siège d'avion (crédits CEVAA)

Enfin, la journée s'est terminée par l'exposé de P. Cranga, AIRBUS HE, intitulé « *Identification de la réponse en vol d'une pale d'hélicoptère* » s'intéressait quant-à-lui à la méthode (Strain Pattern Analysis SPA). Cette approche permet l'identification inverse du torseur des efforts dynamiques transmis par le rotor à la structure d'hélicoptère (cf figure 6) et des déformées de pales. Pour ce faire, des mesures sont effectuées sur les pales équipées de jauges de déformation. L'objectif final est d'optimiser les charges vibratoires induites et de réduire les vibrations en cabine. La base modale est calculée, plutôt qu'obtenue expérimentalement. La méthode peut être utilisée pour étudier des instabilités de type whirl-flutter (signaux instationnaires et non-harmoniques). La méthode SPA s'avère finalement d'une aide précieuse pour la validation du design de la cabine.

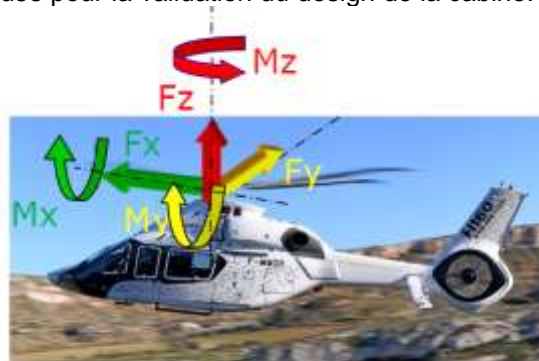


Figure 6 : Efforts transmis par le rotor à la structure

Pour conclure sur cette journée, qui a permis de démontrer une nouvelle fois la grande variété du champ d'application au domaine de l'analyse des structures aérospatiales des méthodes inverses, et leur impressionnant potentiel. Comme il est de coutume pour ce secteur industriel aux exigences particulièrement fortes, il a été maintes fois rappelé au cours de la journée, et évoqué lors des sessions de questions/réponses, à quel point ces méthodes – même les mieux établies - devaient être manipulées avec précaution, en s'appuyant sur la bonne connaissance physique des problèmes étudiés, sur la maîtrise d'une métrologie rigoureuse, et sur une solide expertise dans le domaine d'application.