

Des rafales et des ailes



5 novembre 2014 : dernière journée d'essai à la soufflerie S3 de Meudon. Dans quelques heures, le bruit impressionnant de la soufflerie laissera la place au silence. Après des millions de cycles de fonctionnement, le générateur de rafale sera arrêté et le dispositif d'essai démonté. La maquette sollicitée à de forts niveaux vibratoires pourra enfin sortir de « cette zone de turbulence » pour un repos bien mérité. La campagne expérimentale pour le contrôle actif de charge à la rafale¹ se termine sur une première européenne : l'ONERA vient de démontrer que l'on peut réduire fortement les effets induits par une rafale sur une structure d'aile d'avion en condition transsonique. Retour sur cette campagne, l'aboutissement d'un projet qui a mobilisé dans l'ONERA DADS, DAFE et DCSD.

16 février 2015

Cette campagne d'essai était la dernière étape d'un projet de 6 ans dédié au contrôle de charge, en particulier aux charges à la rafale. Pourquoi cette thématique ? Dans le cadre de Cleansky, de nouvelles configurations sont étudiées pour rendre les avions du futur moins consommateurs en carburant avec comme principaux axes de recherche l'allègement des structures ou la laminarité de l'écoulement. Mais gare aux conséquences : pour éviter que ces solutions impactent l'intégrité des structures, la sécurité ou le confort des passagers, il faut dans le même temps proposer de nouvelles approches en matière de charge.

Le projet conduit par l'ONERA avait plusieurs objectifs :

- analyser et comprendre les phénomènes induits par la rafale dans le domaine transsonique,

- fournir une base de données expérimentale pour valider les codes de simulation haute-fidélité comme elsA. Cette base de données sera en partie partagée avec Airbus et Dassault-Aviation partenaires du projet,
- mettre au point des stratégies de contrôle actif en boucle fermée et en démontrer la faisabilité et l'efficacité en environnement soufflerie.

Arnaud Lepage est le responsable de ce projet. Il explique : « Cette dernière campagne d'essais en soufflerie a duré 4 semaines d'octobre à début novembre 2014 et a impliqué jusqu'à 13 personnes des trois départements scientifiques DADS, DAFE et DCSD. L'une des plus-values est la mise en œuvre du savoir-faire de l'ONERA dans toutes les composantes de ce projet. Nous avons dû étudier et maîtriser toute la chaîne des opérations : depuis la génération des rafales, à l'analyse des données jusqu'à la réalisation du contrôle en temps réel», ajoute-t-il.

Pour cela, les départements ont mis en œuvre leur savoir-faire :

- DADS : conduite d'essais à vocation aéroélastique, conception et instrumentation de maquette d'essai en soufflerie, acquisition de base de données instationnaires et synthèse de loi de contrôle.
- DAFE : mise en œuvre des moyennes souffleries, méthodologies de mesures PIV (vélocimétrie laser) et sonde clinométrique.
- DCSD : conception de modèle de comportement dynamique de système, mise au point d'algorithme de contrôle.

« Effectuer nos essais dans la soufflerie de recherche S3 du DAFE à Meudon était parfaitement adapté pour ce type d'investigation expérimentale. Cela nous a permis d'analyser les données enregistrées au fur et à mesure, et au besoin de mettre en pause les essais pour ajuster des paramètres, puis de reprendre le programme d'essai », indique Arnaud Lepage. « Pour autant, sur la dernière campagne, le planning d'occupation de la soufflerie, a été respecté, malgré les aléas classiques des essais. Toutes les personnes impliquées ont mis leurs compétences et leurs disponibilités au service du projet pour atteindre ce résultat. »

Retour sur les trois grandes étapes qui ont structuré le projet :

- D'abord, pour étudier en soufflerie les phénomènes de turbulence et de rafale en particulier, encore faut-il être capable de les générer. Dans le cadre de ce projet, le département DADS a conçu et utilisé dès 2012 un générateur de rafale pour la soufflerie de recherche S3 de Meudon. Pour la petite histoire, la fabrication des montages d'essai n'était pas financée par le projet. L'ONERA a émis un appel d'offre dans le cadre de Cleansky et la PME Aviation Design qui a conçu le drone EOLE (programme CNES/ONERA) a été retenue.
- Seconde étape : tester l'effet des rafales sur les comportements aérodynamiques et aéroélastiques d'une maquette aéroélastique bidimensionnelle, sans contrôle. Les résultats ont été analysés et étudiés pour identifier des modèles de comportement et définir des stratégies de contrôle actif en boucle fermée.
- Dernière étape, et objet de cette troisième campagne d'essai : tester les différentes approches de contrôle proposées par DADS et DCSD pour réduire l'effet des rafales sur les niveaux de

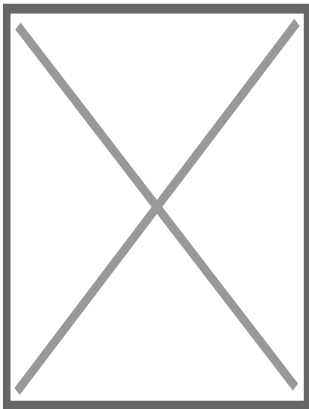
réponses vibratoires de la maquette.

En pratique, les signaux des accéléromètres présents dans la maquette ont été analysés par un ordinateur temps réel qui, à partir de la loi de contrôle implémentée, commande le mouvement instantané de la surface de contrôle. Parmi les résultats significatifs, des réductions considérables de l'ordre de 70% ont ainsi été obtenues sur le niveau de réponse du premier mode aéroélastique de la maquette. « Ces résultats sont vraiment l'aboutissement de plusieurs années de travail et nous avons réussi avec succès à démontrer la faisabilité d'un contrôle actif de charge à la rafale sur une maquette aéroélastique pour des conditions transsoniques » précise Arnaud Lepage.

A ce jour, les applications à l'aéronautique civile de ces techniques sont limitées par des contraintes de certification mais des applications au domaine militaire ou dans le domaine des drones intéressent les constructeurs. « Ces essais se sont inscrits en continuité des travaux internes menés à DADS sur le contrôle aéroélastique et en particulier l'augmentation des marges au flottement et la réduction des charges par contrôle actif » souligne Dominique Le Bihan, ingénieur de recherche à DADS, dans l'unité de recherche Aéroélasticité et dynamique des structures expérimentales (ADSE). Arnaud Lepage poursuit « Cette campagne a été une belle opportunité de réaliser une démonstration en conditions soufflerie. Nous avons associé nos collègues de DCSD pour tester ensemble sur ce cas concret nos outils respectifs d'identification de modèles et de synthèse de contrôleurs ».

Pour demain se profilent des essais sur une maquette 3D dans le cadre de Clean Sky 2. « *Nous pourrions alors approfondir*, sur un démonstrateur plus réaliste, l'étude de ces phénomènes de charge à la rafale, dans le domaine non linéaire en particulier. Cela à nouveau pour enrichir les bases de données d'essais et valider les codes de simulation. Dans le même temps, nous étudierons de nouveaux concepts de surfaces de contrôle ou des moyens de mesure innovants et évaluerons la faisabilité d'intégrer ces développements dans une boucle de contrôle » conclut Arnaud Lepage.

« Créer un environnement aérodynamique conforme aux besoins »

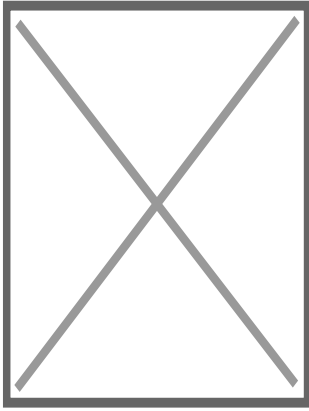


D'un point de vue pratique, nous étions les sous-traitants de DADS, et avons accueillis l'équipe projet dans notre soufflerie. Ils avaient conçu la maquette, les générateurs de rafale et leurs supports. Notre rôle était de produire du vent. Et bien sûr à veiller à ce que toutes les conditions soient réunies pour la conduite nominale de ce projet : garantir le nombre de Mach demandé, maintenir la température génératrice de l'écoulement, bref, créer un environnement aérodynamique conforme aux besoins. Pour installer les vérins du générateur dans la fin du convergent de la soufflerie, il a fallu en démonter les deux parois. Un travail complexe, puisque ces parois n'avaient pas été démontées depuis 25 ans ! Grâce à ce projet innovant, nous avons pour la première fois travaillé sur des essais aéroélastiques à S3Ch. Et nous

sommes prêts aujourd'hui, à en accueillir d'autres.

Jean-Charles Abart, DAFE – Responsable de la soufflerie S3Ch à Meudon

« Intégrer les contraintes de la soufflerie S3Ch dans le montage du projet »

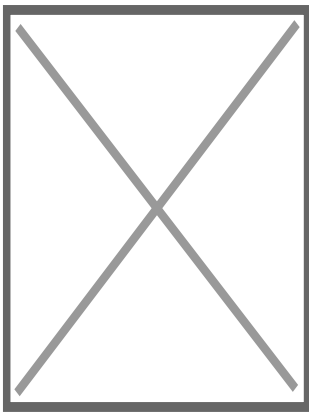


J'étais le référent DAFE pour l'intégration et le montage des maquettes dans S3. En tant qu'expert Aérodynamique j'ai contribué au déroulement de la première campagne d'essai. Mon rôle était d'intégrer les contraintes de la soufflerie de recherche S3 dans le montage du projet (limites de la soufflerie, intégration mécanique, sécurité des installations et des personnes). Avec Arnaud, nous nous sommes posé des questions telles que « Si on fait vibrer la maquette à 80 voire 100 Hz, est-ce que cela ne va pas endommager la soufflerie ? » Il faut en effet se représenter que ces mouvements se font sous une charge aérodynamique importante (environ une tonne à vitesse transsonique, environ 900 km/heure)... Dans la première campagne d'essai dédiée à la mise en œuvre du générateur de

rafales, nous avons mesuré les angles de l'écoulement induits par les rafales à l'aide d'une sonde clinométrique à un point de mesure, puis par PIV (Particle Image Velocimetry) phasée sur le mouvement du générateur. La clinométrie (mesure de l'inclinaison de l'écoulement) par PIV est une technique nouvelle en soufflerie, qui a permis, ici, de contrôler précisément la forme des rafales. Les données des deux moyens coïncidaient parfaitement pour le diagnostic des amplitudes de rafale à l'endroit de la veine où l'on souhaitait installer la maquette. Les deux campagnes qui ont suivi, dont la dernière en boucle fermée, ont permis de réaliser des essais encore jamais effectués au sein de S3Ch. Le résultat de ce projet se distingue par une grande qualité des travaux menés et confirme que l'expérimentation en soufflerie de recherche enrichit les codes de simulation -comme elsA- sur des phénomènes très complexes comme l'aéroélasticité ou l'aérodynamique instationnaire. Ce qui permettra à terme de créer des méthodologies de rupture pour concevoir des avions plus verts et améliorer la sécurité.

Vincent Brion, Ingénieur au DAFE/INST

« Concevoir une instrumentation de précision »



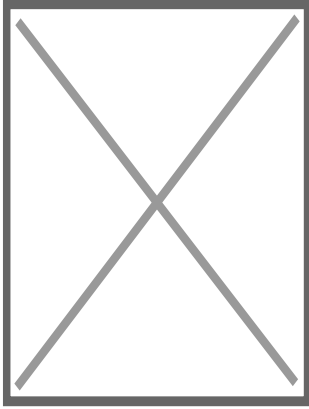
Dans ce projet, tous les mécanismes de mise en mouvement du générateur de rafale ou de la surface de contrôle de la maquette étaient basés sur des systèmes hydrauliques. C'est un domaine dans lequel notre département DADS a une expertise de longue date. J'étais en charge de réaliser les asservissements servohydrauliques pour assurer le bon fonctionnement dynamique de chaque ensemble. Et pour cet essai, la difficulté majeure résidait dans le fait que le montage intégrait jusqu'à six vérins devant fonctionner par paires de manière synchrone. Les parties en mouvement ont ainsi été pilotées jusqu'à des fréquences atteignant les 100Hz. Le tout bien entendu étant placé dans l'écoulement de la soufflerie c'est-à-dire soumis à de fortes charges aérodynamiques. C'est vraiment une étape qui nécessite

de la rigueur et de la précision ... sous peine de retrouver une partie de la maquette au fond de la veine !!!

Ce fut vraiment un projet complet, nous avons pu mettre en œuvre toutes nos compétences en matière de conception maquette, d'instrumentation, de qualification en laboratoire puis de conduite d'essais en soufflerie.

Yannick Amosse, Technicien, DADS/ADSE

« Utiliser des méthodes de contrôle très puissantes et concevoir des algorithmes innovants »



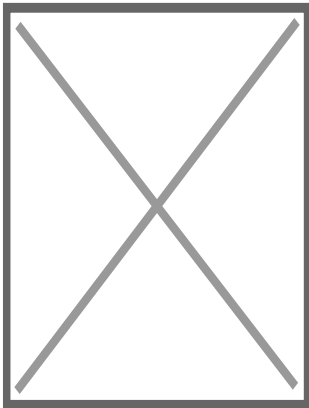
J'ai intégré le projet après la deuxième campagne d'essai pendant laquelle la maquette a été testée en boucle ouverte, c'est-à-dire sans contrôle. Mon objectif : réaliser un contrôleur intelligent qui agisse sur l'aileron de la maquette en quelques millisecondes, pour contrer les effets des rafales. A partir des données fréquentielles, Fabrice Demourant a créé un modèle numérique de comportement du système entier qui reproduit fidèlement les données acquises pendant la deuxième campagne d'essai. Je l'ai ensuite utilisé pour concevoir un algorithme de contrôle pour déterminer la

commande temps réel qui réduise efficacement les niveaux de vibrations sur la maquette. Il n'a fallu que trois mois entre la réception des données et les derniers réglages. Nous avons utilisé pour ce projet des méthodes de

contrôle puissantes et appliqué des algorithmes innovants. Lors des derniers essais en soufflerie, je suis intervenu à Meudon pour implémenter mes lois de contrôle sur le calculateur de mes collègues de DADS. En seulement une journée, nous avons réussi à les faire fonctionner, malgré les petits réglages nécessaires pour l'ajustement des performances en temps réel.

Charles Poussot Vassal, Ingénieur au DCSD/CDIN

« Très peu d'équivalents sur le thème du contrôle de charge à la rafale en transsonique »



Avec du recul, ce fut un projet d'une belle envergure tant par le budget que par le nombre de personnes impliquées. Et j'aimerais ajouter que le cadre de Cleansky SFWA ainsi que le soutien de son chef de projet ONERA, Eric Coustols, nous ont permis de dérouler toute la feuille de route et d'aller au bout de la démarche. Nous avons en effet conçu et fabriqué deux montages d'essai (le générateur de rafale et la maquette), réalisé trois campagnes d'essai en soufflerie, développé un partenariat avec Aviation Design, collaboré avec le DAFE et DCSD, tout en impliquant nos collègues numériciens de DADS / MSAE et nos partenaires Airbus et Dassault-Aviation. D'un point de vue technique, au sein de DADS nous avons naturellement choisi de traiter la problématique de charge sous l'angle de l'aéroélasticité,

c'est-à-dire la réponse vibratoire d'une structure induite par un écoulement aérodynamique. Les résultats obtenus sont de qualité et quand on regarde l'état de l'art, on constate que peu d'établissements de recherche (exceptée la NASA) ont la capacité d'investiguer à la fois la problématique rafale et son contrôle dans le domaine transsonique : nous sommes les premiers en Europe à l'avoir fait. Nous avons démontré que l'ONERA avait au sein de ses départements toutes les compétences sur la thématique du contrôle actif de charge à la rafale.

Arnaud LEPAGE, Ingénieur au DADS/ADSE

Film d'essai 1ère campagne :

Qualification du générateur de rafale. Le mouvement des deux ailes du générateur (au 1er plan) est piloté de manière synchrone. Il n'y a pas de maquette dans la veine d'essai (au 2nd plan) mais une sonde clinométrique instationnaire pour caractériser les rafales générées.

Film d'essai 3ème campagne :

Essais de contrôle de réponse à la rafale. Vue de la maquette d'aile à travers le hublot. Les mouvements sont ralentis 10 fois. Les conditions d'essais sont : écoulement à $Mach = 0.73$, soit une vitesse proche des 900 km/h.

Le générateur de rafale crée une perturbation à 25Hz qui vient exciter la maquette. On observe la réponse de la maquette sur le mode de pompage dont la fréquence propre est proche de la fréquence d'excitation, ce qui se traduit principalement par des déplacements dynamiques verticaux de plusieurs millimètres. Sur les 10 premières secondes, les essais sont sans contrôle puis le contrôle en boucle fermée est activé, l'effet de la gouverne pilotée en temps réel, atténue la réponse vibratoire de la maquette.

¹ Déviation d'un écoulement présent dans le flux d'air qui va exciter une maquette ou un avion, en conditions réelles

² Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe

³ En aérodynamique, fait de comporter un profil laminaire, permettant un glissement des couches du fluide

⁴ Smart Fixed Wing Aircraft Integrated Technology Demonstrator

Cet article a été réalisé en collaboration avec

Jean-Charles Abart, DAFE – Responsable de la soufflerie S3Ch à Meudon

Vincent Brion, Ingénieur au DAFE/INST

Yannick Amosse, Technicien, DADS/ADSE

Charles Poussot Vassal, Ingénieur au DCSD/CDIN

Arnaud LEPAGE, Ingénieur au DADS/ADSE