Aéroacoustique des rotors de micro-drones

Etablissement : ISAE-SUPAERO
Financement envisagé : DGA/ISAE
Début : dernier trimestre 2108
Contacts : Marc C. Jacob (marc.jacob@isae.fr), Thierry Jardin (thierry.jardin@isae.fr)

Problématique générale

Conjointement au développement des micro-technologies, l'émergence récente des micro-drones a permis d'entrevoir de nouvelles perspectives dans maintes applications, allant de l'exploration martienne au sondage atmosphérique, en passant par l'exploration archéologique ou militaire. Dans certains cas, la furtivité de l'engin peut s'avérer indispensable. La furtivité peut être visuelle, caractéristique intrinsèque aux micro-drones (assurée par leurs faibles dimensions), et/ou acoustique. S'agissant de la furtivité acoustique, il est en premier lieu déterminant de s'intéresser à la réduction de la signature aéroacoustique des hélices/rotors du système propulsif.

Le Département d'Aérodynamique et Propulsion (DAEP) de l'ISAE-SUPAERO travaille depuis quelques années déjà sur la réduction du bruit rayonné par les rotors de micro-drone. Dans ce cadre, un premier design de rotor 'furtif' a été obtenu sur la base d'une optimisation aéroacoustique basse-fidélité (faible coût de calcul). Cela a permis de développer des outils de calculs de bruit rayonné par les pales puis de les coupler aux sources estimées par une approche Blade Element Momentum Theory (BEMT) en les intégrant dans une boucle d'optimisation. Une telle optimisation (basse-fidélité) se limite principalement à une réduction du bruit de charge stationnaire et ne permet pas d'agir sur le bruit rayonné par les mécanismes instationnaires caractéristiques des rotors. En vue d'agir efficacement sur ce dernier, il convient d'identifier les mécanismes instationnaires associés, les comprendre, les modéliser pour ensuite les hiérarchiser: en effet, à ce jour les mécanismes aéroacoustiques dominants ne sont pas identifiés car les connaissances acquises depuis les années 60 sur les hélices et les pales d'hélicoptères ne s'appliquent pas aux micro-drones. La raison est que ceux-ci opèrent à des très faibles nombres de Mach et de Reynolds, ce qui disqualifie les principales sources réputées efficaces sur les rotors libres classiques. C'est cet enjeu qu'adressera la présente thèse.

Programme de la thèse

Pour répondre à cet objectif, des simulations numériques haute-fidélité de type Large Eddy Simulations (LES) seront effectuées. Les deux approches Navier-Stokes (NS) et Lattice Boltzmann (LBM), couplées à un solveur Ffowcs-Williams-Hawkings (FWH), seront considérées. Ces simulations seront effectuées sur des rotors canoniques et optimisés (obtenus préalablement par BEMT), à des nombres de Reynolds et de Mach caractéristiques des micro-drones. Des expérimentations sont également prévues en vue de valider l'approche numérique. L'analyse des résultats permettra donc d'identifier, comprendre et hiérarchiser les principales sources de bruit et fournira des données pour la modélisation à ordre réduit de la signature aéroacoustique des rotors de micro-drones. La thèse se déroulera comme suit :

i) Etude bibliographique :

L'aéroacoustique des rotors de micro-drones est une thématique émergente, et reste donc à ce jour très peu adressée dans la littérature scientifique. Les études de Leslie et al [1], Wisniewski et al [2] Zawodny et al [3] et Serré et al [4,5] sont les rares contributions qui peuvent être mentionnées ici. De manière générale, ces études s'attachent à mesurer la signature aéroacoustique de rotors de micro-drones et, dans certains cas, à la réduire par des approches semi-empiriques basse fidélité, à faibles cout de calcul. Comme précisé en introduction, ces méthodes permettent une première réduction du bruit rayonné via la réduction du bruit de charge stationnaire des pales de rotor. Toutefois, le constat qui peut être dressé est qu'il n'existe à ce jour pas d'études portant sur les mécanismes instationnaires sources de bruit sur un rotor de micro-drones. Or, agir efficacement sur le bruit rayonné par un rotor de micro-drone passe nécessairement par une telle connaissance.

[1] A. Leslie, K. C. Wong, D. Auld, Broadband noise reduction on a mini-UAV propeller, in: 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2008
[2] C. F. Wisniewski, A. R. Byerley, W. H. Heiser, K. W. Van Treuren, W. R. Liller, Designing small propellers for optimum e_ciency and low noise footprint, in: 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference, no. AIAA-2015-2267, 2015.
[3] N. S. Zawodny, D. Douglas Boyd Jr, C. L. Burley, Acoustic characterization and prediction of representative, small scale rotary wing unmanned aircraft system components, in: 72nd AHS Annual Forum, 2016.
[4] Serré, R., Gourdain, N., Jardin, T., Moschetta, J.M., Towards silent micro-air vehicles : investigations on an optimized low-Reynolds number rotor, Applied Acoustics, *submitted*
[5] Serré, Chapin, Moschetta, Fournier, Reducing the noise of micro-air vehicles in hover, International Micro-Air Vehicle Conference, 2017

ii) Simulations numériques :

Le cœur de la thèse reposera sur la mise en œuvre de simulations numériques haute-fidélité de type Large Eddy Simulations (LES). Les deux approches Navier-Stokes (NS) et Lattice-Boltzmann Method (LBM) seront considérées. Les premières simulations (NS) seront réalisées sur le code de calcul CharLES^{X} déployé au DAEP. Les secondes (LBM) seront réalisées par le code de calcul Palabos déployé à l'Université de Genève. Ces codes recherche ont tous deux la capacité de traiter des configurations tournantes, de type rotor. Ils fournissent des données aérodynamiques permettant d'évaluer le rayonnement aéroacoustique par couplage avec un outil de propagation de bruit basé sur une méthode Ffowcs-Williams-Hawkings (FWH) et également déployé au DAEP. Ces simulations sur rotor libre se feront en plusieurs étapes.

Dans un premier temps, les simulations seront réalisées sur un rotor classique de micro-drone (type GWS), sur un rotor canonique (profil constant et calage assurant une circulation constante le long de l'envergure) et sur un rotor optimisé (obtenu préalablement par BEMT). Les efforts aérodynamiques générés par les rotors et obtenus numériquement seront confrontés à ceux déjà obtenus expérimentalement au DAEP et à l'University of Illinois Urbana-Champaign (UIUC). Ces confrontations permettront de valider le volet 'aérodynamique' de l'approche numérique. En parallèle, une étude paramétrique visant à évaluer la convergence des simulations vis-à-vis des résolutions spatiales et temporelles employées numériquement sera conduite. La figure 1 montre quelques résultats préliminaires obtenus par l'approche LBM sur deux géométries de rotor (Serré et al, 2018). Elles font apparaître des interactions entre le sillage d'une pale et la pale suivante dans des régimes proches du vol stationnaire, laissant présager l'émergence de mécanismes d'interaction, connus pour être particulièrement efficaces sur le plan aéroacoustique. Une première étape résidera dans la validation de ces résultats préliminaires et dans la détermination des plages de fonctionnement où ils apparaissent.

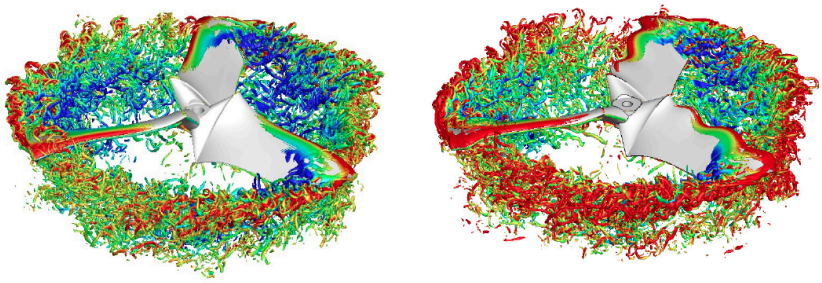

Figure 1 : Exemples de simulations numériques LES réalisées par approche LBM avec application à l'aéroacoustique de rotors de micro-drones.

Dans un second temps, les données issues des simulations numériques LES seront couplées à l'approche FWH en vue d'évaluer le bruit rayonné par ces trois rotors. La signature acoustique associée sera confrontée aux résultats issus d'une campagne expérimentale menée dans le cadre de la thèse. Ces confrontations permettront de valider le volet 'aéroacoustique' de l'approche numérique.

Par la suite, sur la base des résultats numériques obtenus, une analyse physique fine des mécanismes sources de bruit sur ces trois rotors sera réalisée. En particulier, l'approche FWH sera appliquée globalement en vue d'évaluer le bruit généré par le rotor, mais également localement, en vue d'identifier les contributions relatives des différentes parties du rotor. Une attention particulière sera accordée au tourbillon de bout de pale et aux zones d'interaction pale-à-pale (interaction de la pale avec le sillage de la pale précédente). Cette phase permettra d'identifier, comprendre et hiérarchiser les sources de bruit efficaces sur un rotor de micro-drones.

Au vu de cette hiérarchisation, un nouveau design de rotor sera proposé dans le but de réduire les sources de bruit issues des mécanismes instationnaires, tout en conservant les performances aérodynamiques. Ce nouveau rotor sera conçu (CAD) puis simulé numériquement. Quelques itérations sont anticipées à ce stade en vue de converger vers un dessin qui sera par la suite fabriqué puis testé expérimentalement (voir étape iii).

Parallèlement, des méthodes de contrôle basées sur le principe de portance tourbillonnaire seront également considérés en vue de réduire la signature aéroacoustique du rotor. En particulier, on s'intéressera ici au mécanisme de capture tourbillonnaire présent en régime massivement décollé et induit par la mise en rotation non-constante du rotor. Il s'agira d'évaluer dans quelle mesure ce mécanisme peut contribuer à réduire davantage le bruit du rotor. Ce type de contrôle fait déjà l'objet d'études purement aérodynamiques au sein du DAEP.

Les simulations numériques seront réalisées sur le calculateur interne du DAEP pour ce qui est des phases de validation (nouveaux calculateurs de 4000 processeurs prévus pour fin 2018), puis sur des calculateurs nationaux ou régionaux pour ce qui est des phases de production (GENCI, Calmip). La phase de validation s'étalera sur la première année, la phase de production sur les deux suivantes.

iii) Mesures en chambre anéchoïque :

La validité des simulations numériques présentées ci-dessus reposera d'une part sur des mesures aérodynamiques déjà réalisées au DAEP et à l'UIUC, et d'autre part sur des mesures acoustiques conduites au cours de la thèse. Une campagne d'essai est prévue en première année de thèse en

vue de caractériser le bruit rayonné par les trois rotors mentionnés plus haut. Ces mesures seront réalisées en chambre anéchoique : elles comprendront des mesures de champ lointain ainsi qu'une localisation des sources dominantes à l'aide d'une antenne 32 microphones disponible au DAEP.

Par ailleurs, une seconde campagne est prévue en cours de troisième année en vue de caractériser le bruit rayonné par le rotor optimisé sur la base de simulations numériques. Le matériel utilisé sera identique à celui employé pour la première campagne.

iv) Modélisation à ordre réduit :

Une phase de réflexion sera menée sur la manière de modéliser, à ordre réduit, les différentes sources de bruit identifiées. Les modèles existants issus de la littérature relative au bruit de ventilateurs seront évalués dans le cadre d'une application aux rotors de micro-drones. Des modifications pourront être proposées afin de prendre en considération les spécificités des sources de bruit dans ce contexte.

Références de l'équipe

[1] Jacob, M.C., Jondeau, E., LI, B., Time resolved measurements of a tip leakage flow, Internal Journal of Aeroacoustics, 15 (6-7), pp. 662-685, 2016
[2] Serré, Gourdain, Jardin, Sabate-Lopez, Belliot, Jacob, Moschetta, Aerodynamic and acoustic analysis of an optimized low Reynolds number rotor, International Symposium on Transport Phenomena And Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC), 2017
[3] Serré, R., Gourdain, N., Jardin, T., Moschetta, J.M., Towards silent micro-air vehicles : investigations on an optimized low-Reynolds number rotor, Applied Acoustics, *submitted*
[4] Serré, Chapin, Moschetta, Fournier, Reducing the noise of micro-air vehicles in hover, International Micro-Air Vehicle Conference, 2017
[5] Gourdain, Jardin, Serré, Prothin, Moschetta, Application of Lattice Boltzmann Method to some challenges related to Micro Air vehicles, International Micro-Air Vehicle Conference, 2017