



Optimisation aérodynamique d'une Aile Battante par Intelligence artificielle

Directeur.rice.s de thèse : Thierry Jardin/Michael Bauerheim (ISAE) & Laurent David /Nassim Razaaly (Pprime, CNRS-UP-ISAE ENSMA)

Contacts : Thierry.JARDIN@isae.fr; Laurent.DAVID@univ-poitiers.fr

Sujet de thèse :

Les ailes battantes sont une alternative possible aux ailes fixes ou tournantes pour la propulsion d'aéronefs de très faibles dimensions (typiquement inférieures au centimètre) [1]. Ce mode de propulsion/sustentation inspiré du monde vivant a été largement étudié depuis une trentaine d'année maintenant [2,3], conjointement à l'avènement des micro et nanotechnologies. La compréhension des mécanismes physiques à l'origine des forces aérodynamiques générées par l'aile battante a conduit aux développements récents de prototypes miniaturisés à l'extrême, à l'instar du RoboBee de l'université Harvard ou encore de l'OVMi à l'IEMN (figure 1). Malgré ces avancées importantes, la conception d'aéronefs à ailes battantes est loin d'être optimale. La difficulté ici est que l'optimisation aérodynamique de la forme et cinématique de l'aile repose sur un grand nombre de paramètres (géométriques et cinématiques) et que la dynamique de l'écoulement est, contrairement aux modes de sustentation conventionnels (voilures fixes et tournantes) fortement instationnaire et non-linéaire, ce qui empêche l'utilisation de modèles analytiques (linéaires) rapides.

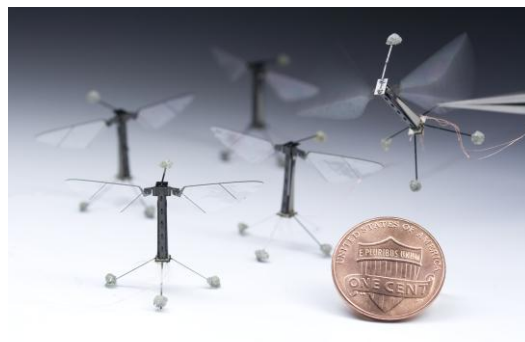
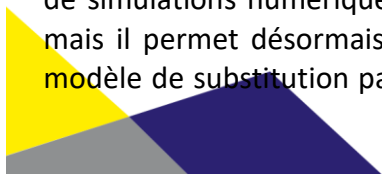


Figure 1 :Le prototype RoboBee de l'université de Harvard (poids : 60mg)

Dans cette thèse, nous proposons de réaliser l'optimisation aérodynamique multi-objectifs (portance et efficacité) du vol battu. L'optimisation sera rendue possible par deux évolutions majeures. La première concerne l'accroissement continu des capacités de calculs, permettant de simuler un grand nombre de configurations. Ce nombre n'est toujours pas suffisant pour réaliser l'optimisation directe (i.e. sur la base de simulations numériques uniquement) sur la totalité des paramètres géométriques et cinématiques mais il permet désormais de générer une base de données de taille suffisante pour (1) entraîner un modèle de substitution par réseau de neurones capables de prédire les performances aérodynamiques



de l'aile à très faible coût de calcul, et donc de réaliser l'optimisation par couplage du modèle avec un algorithme génétique, et (2) réaliser l'optimisation par apprentissage par renforcement. Ces deux approches de type « apprentissage machine » constituent la seconde évolution importante permettant l'optimisation multi-objectifs sur un très grand espace de paramètres.

Le déroulement de la thèse comprend deux étapes.

Dans un premier temps, des simulations numériques de type résolution directe des équations de Navier-Stokes seront mises en œuvre pour les optimisations (1) par couplage du modèle de substitution et d'un algorithme génétique et (2) par apprentissage par renforcement. La première approche a déjà démontré ses preuves pour l'optimisation d'ailes battantes dans un espace de paramètre plus restreint [4]. La seconde approche a démontré ses preuves pour des problèmes de contrôle [5] mais reste à éprouver pour des problèmes d'optimisation multi-objectifs. L'identification de configurations géométriques et cinématiques optimales (incluant la déformation active de l'aile) conduira alors à l'analyse physique des mécanismes à l'origine de cette optimalité via la méthode de partitionnement de force déjà implémentée au laboratoire. Cette première étape sera conduite à l'ISAE-SUPAERO.

Dans un second temps, les approches suscitées seront mises en œuvre par voie expérimentale. Les mesures d'efforts aérodynamiques instationnaires seront utilisées en lieu et place des simulations numériques pour la génération de données permettant l'apprentissage. Contrairement aux données numériques, les données expérimentales sont sujettes au bruit de mesure et d'actuation. La difficulté ici réside donc dans le transfert des approches (1) et (2) abordées en première partie de la thèse d'un environnement « propre » (simulations numériques) à un environnement bruité (expérimentations). Ici encore, l'identification de configurations géométriques et cinématiques optimales conduira alors à l'analyse physique des mécanismes à l'origine de cette optimalité. Ceci nécessite la mise en œuvre de métrologie optique avancée (ex : mesures de l'écoulement 3D par PIV par balayage) et de la méthode de partitionnement de force sur des données expérimentales.

Ce projet de thèse sera mené en partenariat entre l'institut Pprime (CNRS-UP-ISAE ENSMA) à Poitiers et l'ISAE-Supaero à Toulouse qui justifient d'une expertise reconnue de longue date sur le sujet [3-4,6-14] (figure 2). La partie numérique sera réalisée à Toulouse sur une période de 18 mois, les 18 mois restants étant consacrés à la partie expérimentale à Poitiers.

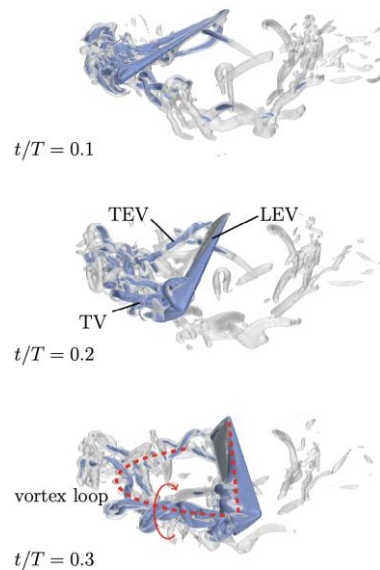


Figure 2 : exemple de simulations numériques réalisées dans le cadre du partenariat institut Pprime/ISAE-Supaero [11]

Références :

- [1] Hawkes, E. W., & Lentink, D. (2016). Fruit fly scale robots can hover longer with flapping wings than with spinning wings. *Journal of the Royal Society Interface*, 13(123), 20160730.
- [2] Dickinson, M. H., Lehmann, F. O., & Sane, S. P. (1999). Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. *Science*, 284(5422), 1954-1960.
- [3] Jardin, T., Farcy, A., & David, L. (2012). Three-dimensional effects in hovering flapping flight. *Journal of fluid mechanics*, 702, 102-125.
- [4] Corban, B., Bauerheim, M., & Jardin, T. (2023). Discovering optimal flapping wing kinematics using active deep learning. *Journal of Fluid Mechanics*, 974, A54.
- [5] Martin, B., Jardin, T., Rachelson, E., & Bauerheim M. (2025) Physics of the vortex gust-airfoil interaction under an optimal mitigation strategy learned through deep reinforcement learning. *Journal of Fluid Mechanics*, accepted
- [6] Jardin, T., David, L., & Farcy, A. (2009). Characterization of vortical structures and loads based on time-resolved PIV for asymmetric hovering flapping flight. *Experiments in Fluids*, 46(5), 847-857.
- [7] David, L., Jardin, T., Braud, P., & Farcy, A. (2012). Time-resolved scanning tomography PIV measurements around a flapping wing. *Experiments in Fluids*, 52(4), 857-864.
- [8] Tronchin, T., David, L., & Farcy, A. (2015). Loads and pressure evaluation of the flow around a flapping wing from instantaneous 3D velocity measurements. *Experiments in Fluids*, 56(1), 1-16.
- [9] Jardin, T., & David, L. (2015). Coriolis effects enhance lift on revolving wings. *Physical Review E*, 91(3), 031001.
- [10] Jardin, T. (2017). Coriolis effect and the attachment of the leading edge vortex. *Journal of fluid mechanics*, 820, 312-340.
- [11] Diaz-Arriba, D., Jardin, T., Gourdain, N., Pons, F., & David, L. (2021). Numerical investigation of three-dimensional asymmetric hovering flapping flight. *Physics of Fluids*, 33(11).

- [12] Díaz-Arriba, D., Jardin, T., Gourdain, N., Pons, F., & David, L. (2022). Experiments and numerical simulations on hovering three-dimensional flexible flapping wings. *Bioinspiration & Biomimetics*, 17(6), 065006.
- [13] Bouard, F., Jardin, T., & David, L. (2024). Aerodynamics of flapping wings with passive and active deformation. *Journal of Fluids and Structures*, 128, 104139.
- [14] Bouard, F., Jardin, T., & David, L. (2024). Hovering flapping wings with dynamic twist. *Physics of Fluids*, 36(11).