

# Linear modeling of unsteady aerodynamic forces

V. Jaunet, G. Lehnasch



<b>Location :</b>	ISAE-ENSMA, Institut Pprime (CNRS, UPR 3346)
<b>Duration :</b>	3 years
<b>Starting date :</b>	October 2022
<b>Profile of candidate :</b>	Master/Engineer
<b>Requirements :</b>	Fluid Mechanics, Stability analysis and Numerical simulation
<b>Allowance:</b>	~1750 €/month + possible teaching
<b>Contact:</b>	Vincent Jaunet <a href="mailto:vincent.jaunet@ensma.fr">vincent.jaunet@ensma.fr</a> Guillaume Lehnasch <a href="mailto:guillaume.lehnasch@ensma.fr">guillaume.lehnasch@ensma.fr</a>
<b>Pour candidater/To apply :</b>	Send CV and motivation letter before April, 11th 2022, to both contacts

Industries in the domain of terrestrial, spatial or aeronautical transport have to rapidly develop disruptive technologies to face economic and environmental constraints that modifies the global consumer market. In this context, the understanding and modelling of aerodynamic unsteadiness, and resulting wall pressure forces, become crucial to optimally design mechanical structures that could maximize efficiency while avoiding any undesired structural or aeroacoustic resonance. The assessment of mean aerodynamic forces has nowadays reached a rather satisfactory industrial standard quality thanks to the use of efficient and low cost modelling approaches (panel methods, RANS models etc). However, the computation of unsteady forces induced by turbulent flows remains very challenging. Indeed, prediction of such forces requires the use of very advanced numerical models (DDES, LES), involving long simulation times and very refined meshes. The prohibitive cost of such tools limits their usage to very specific needs. On the experimental side, unsteady forces estimation is not an easy task neither. The frequency response of the model structure and aerodynamic balance restricts studies to low frequencies, sometimes orders of magnitude lower than what the turbulent structures can produce. The research work proposed through this Ph.D. thesis aims at providing a general framework to estimate more efficiently aerodynamic unsteady wall pressure forces, induced by turbulent flows, with a minimal *a priori* knowledge of the flow, via a Resolvent Analysis (RA).

It is straightforward to show that wall-pressure forces amplitude, at the frequency  $\omega$ ,  $F_\omega$  is directly obtained by integration (on the surface of interest) of the wall pressure second-order statistics at the same frequency, i.e. the Cross-Spectral Density (CSD) matrix  $\mathbf{P}$ ,

$$F_\omega = \iint \mathbf{P}_\omega(\xi, \eta) d\xi d\eta. \quad (1)$$

RA then forms a link between both the input CSD matrix, constituted of non-linear terms of the Navier-Stokes equations acting through the whole turbulent flow, with the output CSD matrix, constituted of the measured quantity we want to model, thus in particular the wall pressure forces of interest. This link is given by the resolvent operator, which is built on a well suited base flow [4, 3]. Hence, RA seems a perfect candidate to model the dynamic pressure forces acting on a wall, induced by a turbulent flow.

The Ph.D. student will focus on the realization of the basis framework for the resolvent-based model, whose basic principles are summarized in figure 1. The first step consists in the construction of a base flow, e.g. from experimental data or RANS models, on which a resolvent analysis is performed. Then, from a subset of resolvent modes, together with some inputs from well-resolved experimental, numerical or modelled data, a low-rank estimation of the wall pressure CSD can be built from which the aerodynamic forces can be estimated. This method has recently been applied to model near- and far-field acoustic pressure intensity of jet flows [5]. The present research project aims at extending this approach to the prediction of dynamic wall-pressure forces. The envisioned technique

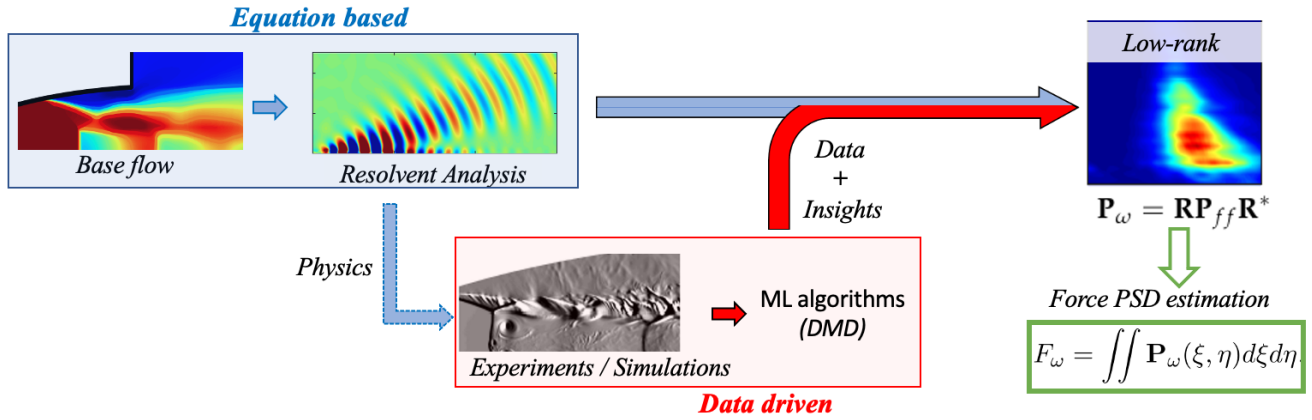


Figure 1: Schematic principles of the resolvent-based force estimation

is general, without any restriction in terms of flow regimes and appears well suited to both canonical situations of bluff body, airfoil or automotive flows. A particularly challenging application, of particular interest in regards with the team's current research, will be the prediction of off axis forces in highly separated nozzle flows [2, 1].

The candidate will be integrated into the 2AT team, FTC department of the PPRIME institute. The candidate will work closely with the team members specialists in high Reynolds number aerodynamics (C. Sicot, J. Boree) and high speed compressible flows (E. Goncalvès, G. Lehnsash, V. Jaunet & P. Jordan). The candidate will be expected to have a strong background in compressible fluid Mechanics and numerical simulation. An experience in linear stability analysis would also be appreciated.

# Modélisation linéaire des forces aérodynamiques instationnaires

L'industrie dans les domaines du transport aéronautique, terrestre ou spatial doit rapidement développer des technologies de rupture pour faire face aux contraintes économiques et environnementales qui modifient le marché de consommation mondial. Dans ce contexte, la compréhension et la modélisation de des instabilités d'écoulements et des forces aérodynamiques instationnaires qui en résultent deviennent cruciales pour concevoir de manière optimale les structures mécaniques qui puissent assurer une efficacité maximale tout en évitant toute résonance structurelle ou aéroacoustique indésirable. L'évaluation des forces aérodynamiques moyennes a aujourd'hui atteint une qualité standard industrielle plutôt satisfaisante grâce à l'utilisation d'approches de modélisation efficaces et peu coûteuses (méthodes panel, modèles RANS etc.). Le calcul des forces instationnaires induites par les écoulements turbulents reste néanmoins un défi majeur. En effet, la prédiction de ces forces nécessite l'utilisation de modèles numériques très avancés (DDES, LES), impliquant des temps de simulation longs et des maillages très fins. Le coût prohibitif de ces outils limite leur utilisation à des besoins très spécifiques. Sur le plan expérimental, l'estimation des forces instationnaires n'est pas non plus une tâche facile. La réponse en fréquence de la structure du modèle et l'équilibre aérodynamique restreignent les études aux basses fréquences, parfois de plusieurs ordres de grandeur inférieures à ce que peuvent produire les structures turbulentes. Les travaux de recherche proposés dans le cadre de ce doctorat visent ainsi à fournir un cadre général permettant d'estimer plus efficacement les forces de pression aérodynamiques instationnaires induites par les écoulements turbulents, avec une connaissance minimale *a priori* de l'écoulement, par le biais d'une analyse résolvante (RA).

Il est simple de montrer que l'amplitude des forces de pression pariétale, à la fréquence  $\omega$ ,  $F_\omega$  est directement obtenue par intégration sur la surface d'intérêt des statistiques de pression pariétale du second ordre à la même fréquence, c'est-à-dire la matrice de densité spectrale croisée (CSD)  $\mathbf{P}$ ,

$$F_\omega = \iint \mathbf{P}_\omega(\xi, \eta) d\xi d\eta. \quad (2)$$

La RA forme alors un lien entre la matrice CSD d'entrée, constituée de termes non linéaires des équations de Navier-Stokes agissant dans l'ensemble de l'écoulement turbulent, avec la matrice CSD de sortie, constituée de la grandeur mesurée que l'on veut modéliser, en particulier donc les fluctuations de pression pariétale. Ce lien est donné par l'opérateur résolvant, qui est construit sur un écoulement de base bien adapté [4, 3]. Par conséquent, la RA semble un candidat idéal pour modéliser les forces de pression dynamiques agissant sur une paroi, induites par un écoulement turbulent.

Le doctorant se concentrera sur la réalisation du modèle à base d'analyse résolvante, dont les principes de base sont résumés dans la figure 1. La première étape consiste en la construction d'un champ de base, par exemple à partir de données expérimentales ou de modèles RANS, sur lequel une analyse résolvante est effectuée. Ensuite, à partir d'un sous-ensemble de modes résolvents et quelques données expérimentales, numériques ou modélisées, bien résolues, une estimation d'ordre bas de la CSD de pression en paroi peut être construite. A partir de cette CSD, les forces aérodynamiques peuvent alors être estimées. Cette méthode a récemment été appliquée pour modéliser l'intensité de la pression acoustique en champ proche et lointain des écoulement jets turbulents [5]. Le projet de recherche proposé vise de façon originale à étendre cette approche à la prédiction des forces dynamiques de pression de paroi. La technique envisagée est générale, sans aucune restriction en termes de régimes d'écoulement. Son efficacité pourra être testée pour diverses situations canoniques d'écoulements d'arrière-corps, de profils d'ailes aéronautiques ou bien automobile. Un objectif particulièrement ambitieux, en lien avec les recherches actuelles de l'équipe, consistera à prédire les efforts latéraux générés par des écoulements massivement décollés au sein de tuyères en régime sur-détendu [2, 1].

Le candidat sera intégré à l'équipe 2AT, département FTC de l'institut PPRIME et travaillera en étroite collaboration avec les membres de l'équipe spécialistes de l'aérodynamique à haut nombre de Reynolds (C. Sicot, J. Boree) et des écoulements compressibles à grande vitesse (E. Goncalves, G. Lehnsash, V. Jaunet & P. Jordan). Le candidat devra posséder une solide expérience en mécanique des fluides compressibles et en simulation numérique. Une expérience en analyse de stabilité linéaire serait également appréciée.

## References

- [1] Florian Bakulu, Guillaume Lehnasch, Vincent Jaunet, Eric Goncalves da Silva, and Steve Girard. Jet resonance in truncated ideally contoured nozzles. *Journal of Fluid Mechanics*, 919:A32, 2021.
- [2] V Jaunet, S Arbos, G Lehnasch, and S Girard. Wall pressure and external velocity field relation in overexpanded supersonic jets. *AIAA Journal*, pages 4245–4257, 2017.
- [3] Lutz Lesshafft, Onofrio Semeraro, Vincent Jaunet, André VG Cavalieri, and Peter Jordan. Resolvent-based modeling of coherent wave packets in a turbulent jet. *Physical Review Fluids*, 4(6):063901, 2019.
- [4] Beverley J McKeon and Ati S Sharma. A critical-layer framework for turbulent pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 658:336–382, 2010.
- [5] Ethan Pickering, Aaron Towne, Peter Jordan, and Tim Colonius. Resolvent-based modeling of turbulent jet noise. *JASA*, 150, 2021.