

---

## **Master thesis : Unsteady pressure measurement around aerodynamic bodies: Development of a calibration apparatus and wind tunnel testing**

**Auteur :** Rigo, François

**Promoteur(s) :** Andrianne, Thomas; Dimitriadis, Grigorios

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil en aérospatiale, à finalité spécialisée en "aerospace engineering"

**Année académique :** 2016-2017

**URI/URL :** <http://labos.ulg.ac.be/wind-tunnel-lab/>; <http://hdl.handle.net/2268.2/2519>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

# Unsteady pressure measurement around aerodynamic bodies: Development of a calibration apparatus and wind tunnel testing

François Rigo

*Supervisors:* T. Andrianne, G. Dimitriadis  
Master in Aerospace Engineering, University of Liège  
Academic year 2016-2017

## Abstract

Separated flows are complex but interesting to study because they are variable and unsteady. They are present for every bluff bodies and stalled streamlined bodies (at high angle of attack). Experimental aerodynamics is able to study these types of flow, using pressure sensors. Due to sensor size, pressure tubes are used to connect the pressure scanner to the tap (where the pressure is effectively measured). Statically, nothing is changed, but when an unsteady flow is studied, the signal measured by the sensor is perturbed by the tube. The Transfer Function of the tube has to be computed, to correct for the pressure measure using an inverse Fourier Transform and to obtain the pressure effectively present at the tap. The correction is made on the fluctuation amplitudes (around the mean) and the phase of the signal. The synchronization is important when vortex shedding is studied. This Transfer Function is computed by comparing the pressure measured at the begin and at the end of the tube. For that purpose, pressure with a frequency content has been applied on the tube entry (periodic for KTH calibrator and aperiodic for ULg calibrator). The ratio between these pressures gave the desired correction, showing resonance peaks for some frequencies. When a simple tube is used, theoretical models from fluid equations give very similar results to experimental ones. A parallel with electricity has also been made, replacing the pressure tube by an RLC circuit or a transmission line. The longer and the narrower the tube, the higher the signal distortion.

3D printed models are nowadays commonly used in experimental aerodynamics, allowing not only to build complex shaped models easily, but also pressure taps directly on the model and pressure channels into the structure. These more complex measurement systems have also to be experimentally calibrated. Indeed, diameter restriction on tap or shrinks in tube channels highly distorts the signal. We used this calibration to correct the pressure on a stalled wind turbine wing (at high incidence). The stall is linked to viscous effects, the flow becoming separated and turbulent. The fluctuations and phase of pressure taps signal have been studied to understand the Reynolds effect on a stalled wind turbine wing. Experiments were compared with CFD and theoretical models to validate the results.

Another application of unsteady pressure that we have studied the vortex shedding process, occurring around bluff bodies (in particular for rectangular cylinders). The synchronization and amplitude fluctuations of these vortices have been corrected using the dynamic calibration device. Fluid-structure interaction (vortex induced vibration) has then been studied: when vortices were ejected at the resonance frequency of the cylinder, the structure entered auto-excitation and vibrated a lot. When the cylinders were closely spaced in the flow (assembled into a grid), they interfered with each other and the vortex shedding process was changed compared to a single cylinder. To understand deeply this grid, theoretical and numerical models have been used (FEM and CFD) in parallel with experimental sensors: accelerometers (for vibration), pressure sensors connected on taps by tubes, Cobra Probe (velocity in the wake of cylinders), Hot Wire (free stream velocity). The study of this process in function of the incidence and the cylinder spacing allowed us to predict airspeed that induces instability. This is crucial in order to find parameters that minimize vibrations occurring on a real grid, with undesirable noise. In conclusion, this work can be used to take into account unsteady effects when pressure is measured around streamlined and bluff bodies.

# Unsteady pressure measurement around aerodynamic bodies: Development of a calibration apparatus and wind tunnel testing

François Rigo

*Promoteurs:* T. Andrianne, G. Dimitriadis

Master en ingénieur civil en aérospatiale, à finalité approfondie, Université de Liège

Année académique 2016-2017

## Résumé

Les écoulements décrochés sont complexes mais intéressants à étudier car variables (instationnaires). Ils sont présents pour tous les corps non profilés. Les corps profilés sont aussi sujet à ce décrochage à grand angle d'attaque. L'aérodynamique expérimentale permet d'étudier ces types d'écoulement avec des capteurs de pression. L'encombrement dû à la taille de ces capteurs rend difficile la mesure directe à la surface des modèles. Des tubes de pression sont donc utilisés pour connecter le capteur (loin du modèle pour ne pas perturber l'écoulement) à l'endroit où la pression veut être connue. Cela ne pose pas de problème pour la mesure de quantité moyenne (ou statique). Lorsque l'écoulement est instationnaire, le signal mesuré par le capteur est perturbé par le tube. La fonction de transfert du tube doit donc être calculée, pour corriger la pression à l'aide d'une transformée de Fourier inverse et obtenir la pression effectivement présente sur le modèle. La correction est réalisée sur l'amplitude des fluctuations (autour de la moyenne) et la phase du signal, très important lorsque la synchronisation est étudiée (éjection de vortex). Cette fonction de transfert est calculée en comparant la pression mesurée au début et à la fin du tube. Une pression avec du contenu fréquentiel est donc appliquée au tube (périodique pour le calibrateur de KTH et apériodique pour celui de l'ULg). Le rapport entre ces pressions donne la correction à appliquer, caractérisée par des pics de résonance à certaines fréquences. Lorsqu'un simple tube est utilisé, les modèles théoriques basés sur les équations fluides donnent les mêmes résultats que l'expérience. Un parallèle peut être fait entre un tube de pression, un circuit RLC et une ligne de transmission. Plus le tube est long et fin, plus le signal est déformé.

Les modèles imprimés en 3D sont de plus en plus utilisés en aérodynamique expérimentale, de manière à imprimer directement des canaux de pression, des formes plus complexes. La forme de ces canaux étant plus complexe, une calibration expérimentale est nécessaire. En effet, une restriction de diamètre à la prise de pression ou dans le coude d'un canal perturbe beaucoup le signal. Nous avons utilisé cette calibration est très utile pour corriger la pression sur une pale d'éolienne décrochée (à grande incidence). Le décrochage est lié aux effets visqueux et à la séparation de l'écoulement. L'effet Reynolds peut être étudié à l'aide des fluctuations de pression, caractéristique de la turbulence. L'expérience est comparée avec des modèles CFD et théoriques pour en valider les résultats.

L'éjection de vortex, autour de corps peu profilés (cylindre rectangulaire par exemple) constitue un autre exemple de pression instationnaire que nous avons étudié. La calibration a été utilisée pour corriger les fluctuations et la phase du signal de pression. L'interaction fluide-structure a pu alors être étudiée: lorsque les tourbillons ont été éjectés à la fréquence propre de la structure, le cylindre s'est auto excité et a beaucoup vibré. Lorsque des cylindres ont été placés proche les uns des autres (dans une grille), ils ont interféré les uns avec les autres et le processus était différent de celui d'un cylindre seul. Pour comprendre en détail le phénomène de grille, des modèles théoriques et numériques (FEM et CFD) ont été utilisés en parallèle avec des capteurs expérimentaux: accéléromètres (vibration), capteur de pression à la surface des cylindres, sonde Cobra (vitesse dans le sillage), fil chaud (vitesse incidente). L'étude de ce processus en fonction de l'incidence et de l'espacement a permis de prédire la vitesse qui produisait l'instabilité. Ceci fut crucial pour trouver les paramètres qui minimisent les vibrations apparaissant sur la grille réelle (produisant un bruit indésirable). En conclusion, ce travail peut être utilisé pour tenir compte et étudier les effets instationnaires, lorsque la pression est mesurée autour de corps aérodynamiques ainsi que pour éviter les instabilités fluide-structure, pour des grilles ou des constructions du génie civil.

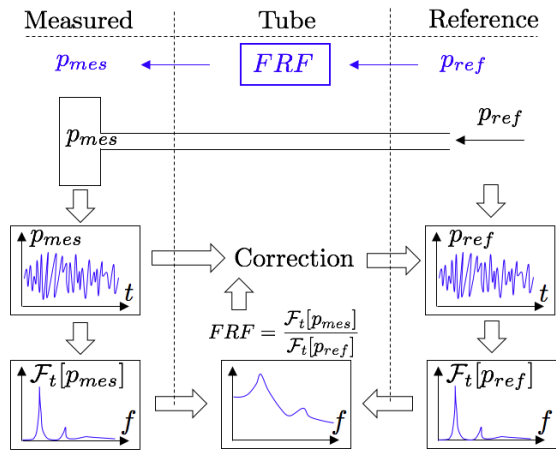


Figure 1: Principle of dynamic calibration of pressure tube

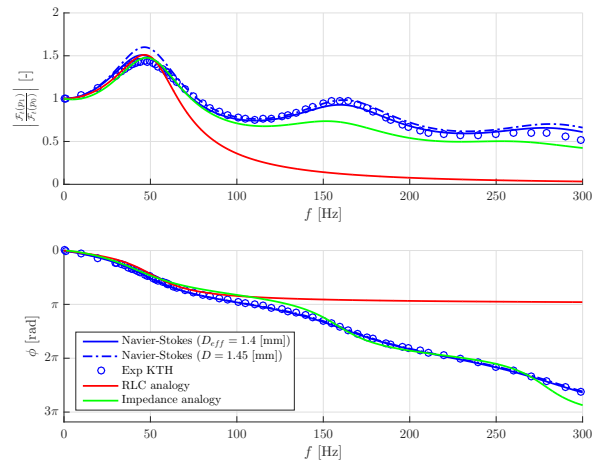


Figure 2: Dynamic response: comparison of methods for a tube of length 1.3 [m] and diameter 1.37 [mm]

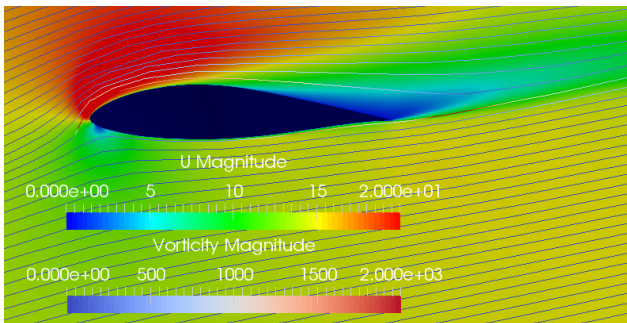


Figure 3: CFD: Flow around the wing profile at  $U = 15$  [m/s] and  $\alpha = 14$  [°]

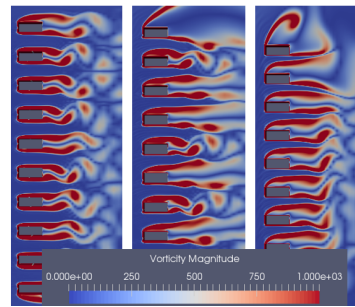


Figure 4: CFD: Vorticity around the grid (10 rectangular cylinders) at  $\alpha = 0, 25, 50$  [°],  $U = 5$  [m/s] and a spacing of  $T/D = 2$

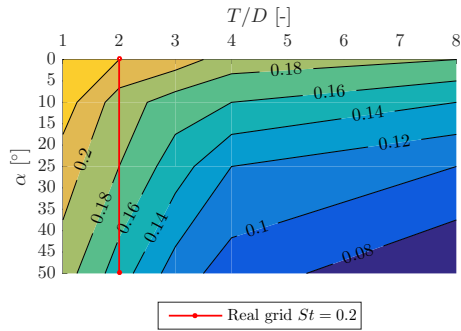


Figure 5: Strouhal number of the grid cylinders depending on  $\alpha$ , spacing  $T/D$

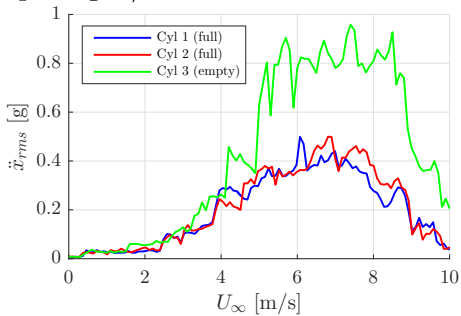


Figure 6: VIV curve: comparison of cylinders response, *in situ*

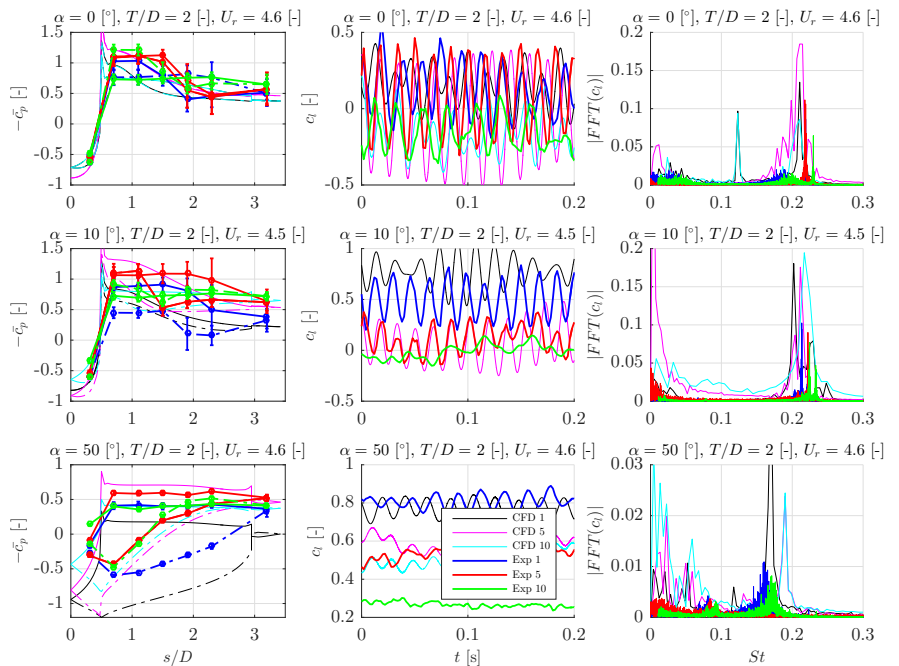


Figure 7: Pressure distribution around cylinders, lift variation and frequency content: comparison experiment-CFD