



Instabilités aéroélastiques d'un profil d'aile à des régimes d'écoulement transitionnelles

Aeroelastic instabilities of an airfoil in transitional flow regimes

Soutenance de thèse – Diogo Ferreira Sabino

Mardi 07 juin 2022 à 14 H 00

En présentiel : Salle AY-02-63 à Onera Meudon

En distanciel : Visioconférence CM DAAA-Ay-02-63 (vcm02.onera.fr – IP 144.204.6.2)

Devant le jury composé de :

- **Directeur de Thèse :**
 - * David Fabre (Maître de conférences, HDR), Institut National Polytechnique (INP/IMFT), Toulouse, France
- **Rapporteurs :**
 - * Ardeshir Hanifi (Docent), KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Suède
 - * Jean-Christophe Robinet (Professeur), Arts et Métiers Paris Tech, France
- **Examineurs :**
 - * Rémi Bourguet (Chercheur CNRS), IMFT, Toulouse, France
 - * Stefania Cherubini (Professeure), Politecnico di Bari (POLIBA), Bari, Italie
 - * Guilhem Michon (Professeur), ISAE-SUPAERO, Toulouse, France
- **Encadrant :**
 - * Olivier Marquet (Maître de Recherche), ONERA, DAAA/MAPE, Meudon, France
- **Invité :**
 - * Vincent Mons (Ingénieur Chercheur), ONERA, DAAA/MAPE, Meudon, France

-----0-----

Résumé / Abstract

Cette thèse porte sur l'étude de l'instabilité aéroélastique provenant de l'interaction fluide–structure, dans le cas d'une aile rigide montée sur un ressort en torsion. L'étude est centrée sur le phénomène de flottement dû à un décollement laminaire, et plus précisément sur les oscillations (en torsion) auto-entretenues détectées expérimentalement pour un profil NACA0012 à faible incidence, dans la gamme de nombre de Reynolds dits transitionnels ($Re \in [10^4 - 10^5]$) caractérisé par un décollement de la couche limite initialement laminaire, suivi d'une transition et d'un rattachement.

L'objectif principal de cette thèse est d'expliquer ce phénomène en se basant sur des concepts d'instabilité. Pour ce faire, différentes approches numériques ont été conduites : des simulations numériques bidimensionnelles et des simulations numériques tridimensionnelles (DNS). Ces approches ont ensuite servi de base à des analyses de stabilité linéaire (LSA) autour d'un champ moyen ou d'un champ périodique (analyse de Floquet). Le deuxième objectif vise à explorer les différents scénarios non linéaires qui apparaissent dans cette gamme de Reynolds. La première partie de la thèse est consacrée à la caractérisation de l'écoulement autour de l'aile pour des angles d'incidence fixes. Des simulations temporelles bidimensionnelles montrent l'apparition d'oscillations à haute fréquence associées au détachement tourbillonnaire en aval du profil à partir de $Re \approx 8000$.

Une analyse de stabilité hydrodynamique (Floquet) est réalisée pour caractériser la transition vers un écoulement tridimensionnel. Des simulations tridimensionnelles sont ensuite réalisées pour $Re = 50\,000$ afin de caractériser l'écoulement instantané et moyenné. L'analyse des forces moyennes exercées sur l'aile à incidence fixe permettent de détecter une rigidité aérodynamique négative (rapport moment-incidence) pour la gamme $|\alpha| \lesssim 2^\circ$, indiquant une instabilité aéroélastique statique.

La deuxième partie de la thèse concerne la caractérisation de l'instabilité primaire fluide–structure en utilisant une analyse LSA autour des champs moyen et périodique. En considérant la position d'équilibre symétrique $\alpha = 0^\circ$, l'analyse montre la présence d'un mode statique instable, en accord avec l'existence d'une rigidité aérodynamique négative.

Dans une troisième partie, l'émergence de l'oscillation de flottement est étudiée via des simulations aéroélastiques bidimensionnelles. Cette investigation montre que l'apparition des oscillations se fait dans un premier temps autour d'une position d'équilibre non nulle ($\alpha \neq 0^\circ$), où des solutions chaotiques et quasi-périodiques coexistent pour les mêmes paramètres structuraux, et évolue vers un scénario où les oscillations se font autour de $\alpha = 0^\circ$.

La dernière partie de cette thèse essaie d'expliquer la déstabilisation des positions d'équilibre non nulles conduisant à un comportement quasi-périodique à l'aide d'analyses LSA autour des champs moyens et périodiques à incidence fixe. Même si ces analyses sont incapables de prédire un mode propre instable, nous concluons que l'inclusion du terme des contraintes de Reynolds dans la dynamique de perturbation de l'écoulement moyen a un effet important.

---0---

This thesis investigates aeroelastic instability phenomena arising in coupled fluid–structure interactions, considering the flow around a rigid airfoil mounted on a torsion spring. The focus is on the laminar separation flutter phenomenon, namely a self-sustained pitch oscillation detected experimentally on a NACA0012 airfoil in the transitional Reynolds number regime ($Re \in [10^4 - 10^5]$) at low incidences, characterised by a detachment of an initially laminar boundary layer followed by its transition and subsequent reattachment.

The main objective of the thesis is to explain this phenomenon in terms of instability concepts. For this, a combination of numerical approaches involving two- and three-dimensional Navier–Stokes simulations—the latter refereed to as Direct Numerical Simulations (DNS)—along with linear stability analyses (LSA) around a mean flow or a periodic flow (Floquet analysis) is employed. A second objective is to numerically explore the different nonlinear scenarios appearing in the low-to-moderate Reynolds number regime. The first part of the thesis is devoted to the characterisation of the fluid flow around the airfoil considering fixed incidences. Two-dimensional time-marching simulations are first employed, showing the emergence of high-frequency vortex shedding oscillations for $Re \approx 8\,000$. A hydrodynamic stability analysis (Floquet) is then employed to characterise the transition to a three-dimensional flow, and DNS is eventually used to characterise both instantaneous and averaged flow quantities at $Re = 50\,000$. An analysis of the mean forces exerted on a fixed-incidence wing allows to detect a negative aerodynamic stiffness (torque-to-incidence ratio) in the range $|\alpha| \lesssim 2^\circ$, indicating a static instability.

The second part of this thesis is devoted to the characterisation of the primary instability of the fluid–structure coupled system using LSA around the mean and periodic flow fields. Considering the symmetrical equilibrium position $\alpha = 0^\circ$, the analysis shows the presence of an unstable static mode, in accordance with the existence of a negative aerodynamic stiffness.

In the third part of the thesis, the emergence of self-sustained flutter oscillations is investigated via two-dimensional aeroelastic simulations. The investigation shows that the system first transitions towards a pitch oscillation around the nonsymmetrical equilibrium position ($\alpha \neq 0^\circ$), with coexistence of chaotic and quasi-periodic solutions for the same structural parameters, and subsequently transitions towards a pitch oscillation around the symmetrical position ($\alpha = 0^\circ$) as the Reynolds number increases.

In the last part of this thesis, an attempt is made to explain the destabilisation of the nonsymmetrical equilibrium positions leading to a quasi-periodic behaviour using LSA around the mean and periodic flow fields at fixed incidences. Even if these analyses are unable to predict an unstable eigenmode, we conclude that the inclusion of the Reynolds stress term in the mean flow perturbation dynamics has an important effect.

-----0-----

Mots clés / Key words

INSTABILITE AEROELASTIQUE – NOMBRE DE REYNOLDS TRANSITIONNELLES
FLOTTEMENT DU A UN DECOLLEMENT LAMINAIRE – STABILITE LINEAIRE
ANALYSE DE FLOQUET

*AEROELASTIC INSTABILITIES - TRANSITIONAL REYNOLD NUMBER
LAMINAR SEPARATION FLUTTER - LINEAR STABILITY - FLOQUET ANALYSIS*