Analyse de bifurcations rencontrées en dynamique du vol et en aéroélasticité

Sébastien KOLB, CReA

Mots-clés : théorie des bifurcations, dynamique du vol, aéroélasticité

La dynamique du vol d'un avion et l'aéroélasticité sont deux domaines de l'aéronautique qui sont souvent étudiés dans un cadre purement linéaire. Néanmoins certains phénomènes non-linéaires peuvent exister et nécessitent d'avoir recours à la théorie des bifurcations entre autres afin d'être examinés correctement. Cette communication vise à présenter des cas où cette approche non-linéaire se révèle indispensable ainsi que les adaptations méthodologiques à réaliser lors de cette analyse.

Un premier cas d'étude est celui du vol longitudinal, normalement une position de la gouverne de profondeur δ_e correspond à un unique point de vol [1]. Néanmoins sur la figure 1 associée à un vol longitudinal d'un avion de combat F-18 et présentant le Mach de vol (à l'équilibre) en fonction de la gouverne de profondeur δ_e (commande de tangage), d'une part, une bifurcation de Hopf donne lieu à l'apparition de cycles limites stables donc à un comportement oscillatoire périodique imprévu et d'autre part, deux bifurcations réelles (fourche) ont pour conséquence une plage de valeurs de la commande de tangage δ_e pour laquelle il existe plusieurs états d'équilibre, ce qui peut aussi déstabiliser le pilote.

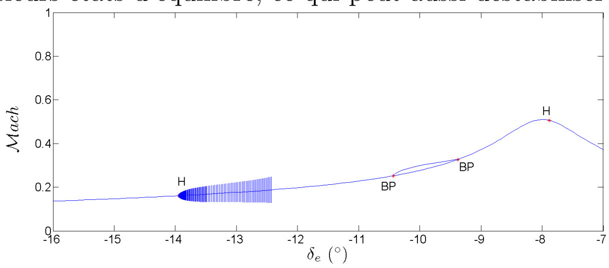

Figure 1: Diagrame de bifurcation avec la profondeur δ_e comme paramètre de contrôle et une manette des gaz fixée à $thr = 60\%$: orbites périodiques crées par la bifurcation de Hopf, états d'équilibre multiples

Un deuxième cas d'étude est celui d'une aile dont le mouvement provient du couplage entre l'écoulement aérodynamique et les propriétés de la structure, normalement à une vitesse aérodynamique correspond un seul état qui peut être stable ou instable (divergence menant à la rupture de l'aile). Mais sur la figure 2 donnant l'incidence α (à l'équilibre) en fonction de la vitesse aérodynamique U, une bifurcation de Hopf sous-critique apparaît [2]. Elle crée des orbites périodiques instables qui eux-même redeviennent stables suite à une bifurcation (noeud-col) de cycles limites. Il s'ensuit que pour des vitesses inférieures à la vitesse critique de flottement, en plus du point d'équilibre stable, le couplage aéro-structure peut donner lieu à des oscillations périodiques de l'aile qui peuvent surprendre.

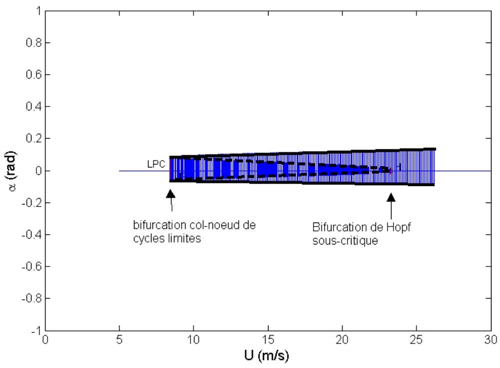

Figure 2: Diagramme de bifurcation avec la vitesse aérodynamique U comme paramètre de contrôle : bifurcation de Hopf sous-critique, bifurcation de cycles limites

Par ailleurs, un soin particulier doit être apporté au choix des algorithmes et à leur paramétrage afin d'éviter un biais supplémentaire par rapport à la physique et de bien capturer les caractéristiques des points critiques [3].

Références

[1] N.K. Sinha & N. Ananthkrishnan, *Elementary Flight Dynamics with an Introduction to Bifurcation and Continuation Methods*, CRC Press, 2014.

[2] G. Dimitriadis, *Introduction to nonlinear Aeroelasticity*, John Wiley & Sons Ltd, 2017.

[3] W. Govaerts, *Numerical Methods for Bifurcations of Dynamical Equilibria*, SIAM, 2000.

Sébastien KOLB, Centre de Recherche de l'Armée de l'air, BA 701, 13661 Salon Air
`sebastien.kolb@defense.gouv.fr`