

# Analyse de bifurcations issues de la dynamique du vol non-linéaire des hélicoptères

Sébastien KOLB, CReA

Pierre-Marie BASSET, ONERA

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

La dynamique du vol des hélicoptères est fortement non-linéaire de par la dynamique complexe et prépondérante du rotor principal et à cause des nombreux couplages entre les variables physiques et les différents éléments constitutifs. Les commandes de vol électriques modernes qui aident normalement au pilotage de l'aéronef peuvent aussi malheureusement donner lieu à de brusques changements de comportement.

Au cours de cette communication, deux cas concrets issus de la dynamique du vol des hélicoptères et associés à différents types de bifurcations sont examinés i.e. des bifurcations de points d'équilibre et d'orbites périodiques.

Le premier phénomène physique étudié correspond à une bifurcation réelle de points d'équilibre. Il s'agit de l'état d'anneaux tourbillonnaires qui se produit lors de vols de descente à forte pente pour lesquels le rotor peut évoluer dans son propre sillage. L'analyse de la dynamique sous-jacente révèle un **hystérésis** [2] et le calcul du lieu des points de bifurcations permet de délimiter avec succès la région d'instabilités [3].

Le deuxième phénomène abordé est celui d'oscillations induites par le pilote. Ce dernier est un couplage dynamique entre l'action du pilote et la réponse de l'aéronef qui interagissent en opposition de phase. Il est déclenché ici par un élément non-linéaire présent dans la chaîne de commande. Une **bifurcation de cycles limités** apparaît dans des conditions de vol particulières et pour certains pilotes (un peu nerveux). Pour une tâche consistant à atteindre une consigne fixe, l'existence d'une **bifurcation nœud-selle d'orbites périodiques** [2] fait apparaître soudainement des oscillations dans le système en boucle fermée rendant impossible le contrôle de l'appareil. En outre, lorsque le pilote essaie de suivre une référence sinusoïdale, un **saut de résonance non-linéaire** [2] peut se produire et engendrer un accroissement soudain de l'amplitude des oscillations. L'analyse par la théorie des bifurcations permet de détecter et de caractériser les variations subites et parfois dangereuses de qualités de vol.

En résumé, on montrera que la théorie des bifurcations est un outil intéressant et efficace pour étudier en profondeur la dynamique du vol non-linéaire des hélicoptères. Des solutions concrètes pourront par ailleurs être envisagées et validées ensuite grâce à l'analyse non-linéaire.

## Références

- [1] S. KOLB, *Analyse de la dynamique du vol non-linéaire des hélicoptères par la théorie des bifurcations*, Thèse INP Grenoble, 2007.
- [2] J. GUCKENHEIMER & P. HOLMES, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields*, Springer, 2002.
- [3] P-M. BASSET, C. CHEN, J.V.R. PRASAD & S. KOLB, *Prediction of Vortex Ring State Boundary of a Helicopter in Descending Flight by Simulation*, Journal of the American Helicopter Society, 23 (2), 2008.

**Sébastien KOLB**, Centre de Recherche de l'Armée de l'air, École de l'air, BA 701, 13661 SALON AIR  
sebastien.kolb@inet.air.defense.gouv.fr

**Pierre-Marie BASSET**, Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales, BA 701, 13661 SALON AIR  
pierre-marie.basset@onera.fr